



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**PROJETO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO PARA
WHEY PROTEIN EM UMA EMPRESA DE SUPLEMENTOS
ALIMENTARES**

Douglas Henrique Welter

Lajeado, dezembro de 2020

Douglas Henrique Welter

**PROJETO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO PARA
WHEY PROTEIN EM UMA EMPRESA DE SUPLEMENTOS
ALIMENTARES**

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Química, da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Catto

Lajeado, dezembro de 2020

RESUMO

Atualmente a suplementação alimentar não se encontra direcionada apenas para atletas profissionais, mas também para pessoas que praticam qualquer tipo de exercício físico. Por essa razão, empresas de suplementos ampliam cada vez mais mercado, movimentando nos últimos anos bilhões de reais no Brasil. Porém para atingir padrões de qualidade exigidos pelos consumidores, é necessário aprimorar os processos de fabricação destes produtos. Neste estudo foi avaliado o processo produtivo de uma empresa de suplementos alimentares, localizada no Vale do Taquari, a qual atualmente não possui nenhum transporte automatizado e pretende investir em um sistema de transporte pneumático para o empacotamento do suplemento *Whey Protein*. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi realizar o projeto deste sistema de transporte pneumático, desenvolvendo além disso um *Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)* do sistema e uma avaliação dos custos totais para uma futura implementação. Dentre os resultados do dimensionamento do sistema, verificou-se que a velocidade de transporte calculada foi de 14,93 m/s, sendo este valor característico de um transporte em fase diluída. Foram definidos também o diâmetro e comprimento de tubulações, além dos demais equipamento do sistema. A potência necessária para o compressor de ar ficou em torno de 0,08 HP. Com o *P&ID* foi possível definir os principais instrumentos e válvulas do sistema, descrevendo assim a lógica de funcionamento e controle operacional. Por fim, comparando-se a capacidade produtiva atual com a estimada após implementação do projeto, verificou-se que com a implantação haveria um aumento de 260% na capacidade produtiva da empresa, o que eliminaria operações manuais realizadas no envase atual, reduzindo assim gastos de fabricação e se tornando mais competitivo no mercado.

Palavras-Chave: Transportador de sólidos. Transporte pneumático. *Whey protein*. Operações unitárias. Dimensionamento.

ABSTRACT

Currently, food supplementation is not only aimed at professional athletes, but also at people who practice any type of physical exercise. For this reason, supplement companies are getting more market, moving in the last years around billion reais in Brazil. However, in order to achieve quality standards demanded by consumers, it is necessary to improve the manufacturing processes of these products. Currently, a food supplement company, located in the Taquari Valley, does not have a transport system and intends to invest in the development and implementation of a pneumatic transport system in the production area to transport the Whey Protein supplement from the mixer to the packer. Thus, the objective of this work was to carry out the design of this pneumatic transport system, further developing a Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) of the system and an evaluation of the total costs for future implementation. Among the results of the system sizing, it was found that the calculated transport speed was 14.93 m/s, this characteristic of a diluted phase transport. The diameter and length of pipes were also defined, in addition to the other equipment in the system. The power required for the air compressor was around 0.08 HP. With the P&ID, it was possible to define the main instruments and valves of the system, thus describing the logic of operation and operational control. Finally, comparing the current productive capacity with that estimated with the implementation of the project, it was found that the implementation there would be a 260% increase in the company's productive capacity, which would eliminate manual operations carried out in the current packaging, reducing manufacturing costs and becoming more competitive in the market.

Keywords: Solid conveyor. Pneumatic conveying. Whey protein. Unitary operation. Sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um grupo de peneira da série Tyler sobre um agitador magnético.....	20
Figura 2 – Transportador por esteira.....	24
Figura 3 – Transportador por elevação de baldes.....	24
Figura 4 – Fluxograma simplificado dos elementos básicos de um sistema de transporte pneumático.....	25
Figura 5 – Imagem ilustrativa de um compressor centrífugo.....	29
Figura 6 – Sistema de transporte pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b) ..	31
Figura 7 – Fluxograma de fabricação de suplementos alimentares usados na empresa	33
Figura 8 – Fluxograma do processo de envase do <i>Whey Protein</i> utilizado atualmente pela empresa.....	34
Figura 9 – Esquema de coleta do material do fundo do misturador <i>Ribbon Blender</i> (a) e capela para envase dos insumos misturados dentro das embalagens (b).....	35
Figura 10 – Etapa de envase do <i>Whey Protein</i> nas embalagens finais do produto ..	36
Figura 11 – Esquema de identificação de instrumentos e equipamentos <i>P&ID</i>	41
Figura 12 – Fluxograma geral do sistema de transporte pneumático.....	47
Figura 13 – Imagem ilustrativa do funcionamento da válvula solenoides 2/2.....	48
Figura 14 – Imagens ilustrativas com as dimensões do misturador <i>Ribbon Blender</i> ..	49
Figura 15 – Imagem em 2D do tanque receptor de produto após a mistura	50
Figura 16 – Imagem do compressor Schulz, modelo CSL 15BR/100 a ser usado para o projeto	51
Figura 17 – Imagem ilustrativa da válvula solenoides 5/2	52
Figura 18 – Imagem ilustrativa dos tubos de acrílico para o sistema de transporte ..	53
Figura 19 – Esquema ilustrativo mostrando a bomba de vácuo com a tecnologia COAX®	53
Figura 20 – Imagem ilustrativa e dimensões da empacotadora semiautomática	54
Figura 21 – Diagrama <i>P&ID</i> do sistema de transporte pneumático proposto.....	55
Figura 22 – Dados de controle de produção mês a mês, analisados de janeiro a outubro de 2020	60
Figura 23 – Simulação comparativa de rendimento da produção atual e da futura implementação do sistema de transporte pneumático	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre <i>mesh</i> e abertura de μm para peneiras da série Tyler.....	20
Tabela 2 – Relação do diâmetro da tubulação com o comprimento equivalente	39
Tabela 3 – Relação de equipamentos com os valores de perda de carga	40
Tabela 4 – Resultados obtidos na análise granulométrica do Whey Protein.....	44
Tabela 5 – Resultados dos cálculos executados para o dimensionamento	46
Tabela 6 – Controle de produção do <i>Whey Protein</i> no ano de 2020	59
Tabela 7 – Comparação de unidades envasadas pela empacotadora com redução das horas trabalhadas	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Técnicas mais comuns de determinação de diâmetro de partícula.....	19
Quadro 2 – Tags de identificação dos instrumentos e alarmes envolvidos no projeto	56
Quadro 3 – Lista de equipamentos e siglas envolvidas no projeto.....	56
Quadro 4 – Custos dos equipamentos do novo sistema de transporte pneumático..	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\overline{D_a}$	Diâmetro médio aritmético
$\overline{D_s}$	Diâmetro médio superficial
$\overline{D_{sa}}$	Diâmetro de Sauter
$\overline{D_v}$	Diâmetro médio volumétrico
A_i	Área de uma partícula
m_i	Massa de uma partícula
ε_p	Porosidade do material particulado
ρ_p	Densidade específica do material
ρ_{pa}	Densidade específica aparente do material
μm	Micrômetro
atm	Atmosfera
BCAA	Branched Chain Amino Acids
C	Capacidade do transportador
cm	Centímetro
Dt	Diâmetro do tubo
F	Fator de potência
g	Gramas

H	Elevação (m)
HP	<i>Horse-power</i>
kg/batelada	Quilograma por batelada
kg/m ²	Quilograma por metro quadrado
L	Comprimento do transportador
Le	Comprimento equivalente das curvas, válvulas e demais conexões
Lh	Comprimento total dos trechos horizontais
Lt	Comprimento total
Lv	Comprimento total dos trechos verticais
M	Massa total da amostra
m/s	Metro por segundo
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
mi	Massa retina na peneira i
mm	Milímetro
Ø	Diâmetro
P	Potência requerida
Pv	Potência do ventilador ou soprador
Q	Capacidade volumétrica
Qg	Vazão do gás de transporte
t/h	Tonelada por hora
t/m ³	Tonelada por metro cúbico
Vt	Velocidade de transporte
V	Volume da amostra
X	Concentração em peso de sólido transportado
ΔPe	Perda de carga nos equipamentos do transportador pneumático
ΔPt	Fator de redução da perda de carga por aceleração

ΔP_t	Perda de carga total do sistema pneumático
$\Delta \phi_i$	Fração retida
ρ	Densidade aparente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Indústria e Mercado dos Suplementos	15
2.2	Operações Unitárias na Engenharia	16
2.3	Caracterização de Partículas	17
2.3.1	Tamanho da Partícula	18
2.4	Transporte de Sólidos	22
2.4.1	Transportador por Esteira	23
2.4.2	Transporte por Elevação de Balde	24
2.4.3	Transportadores Pneumáticos	25
2.4.3.1	Válvulas para Sistemas de Transporte Pneumático	27
2.4.3.2	Equipamento de Vácuo	28
2.4.3.3	Tubulações	29
2.4.3.4	Coletores (Empacotadora)	30
2.4.3.5	Características e Configurações de Transportadores Pneumáticos	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	Sistema de Produção Atual	34
3.2	Análise das Características do <i>Whey Protein</i>	36
3.3	Dimensionamento do Transportador Pneumático	37
3.4	Desenvolvimento de um Diagrama <i>P&ID</i>	41
3.5	Levantamento de Custos do Sistema	41
3.6	Avaliação do Rendimento da Produção Após Implantação de Novo Sistema de Transporte Pneumático	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Características do Sistema	46
4.2	Detalhamento do Processo	47
4.3	Lógica do Sistema de Controle	54
4.4	Levantamento de Custos Com Materiais, Equipamentos e Instrumentos ..	58

4.5	Avaliação do Rendimento da Produção Após Implementação do Novo Sistema de Transporte Pneumático	59
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Aliado às atividades físicas, muitos acreditam que os suplementos alimentares possam melhorar o desempenho físico, recuperar o desgaste provocado pelos treinos frequentes ou ainda compensar uma dieta inadequada. Esses produtos são geralmente oferecidos como resposta para aumentar o rendimento nas diversas práticas de exercícios, inclusive por nutricionistas (DARIDO; RANGEL, 2017).

Nesse contexto, a suplementação não se encontra mais “restrita” apenas a atletas que visam melhorar o desempenho. Isso ilustra que o consumo de suplementos por parte de praticantes de exercícios (que não são atletas) aumenta a cada dia (BACURAU, 2009). Conforme estudos de Maximiano e Santos (2017), o uso destes produtos por praticantes de atividades físicas regulares vem aumentando notavelmente.

Segundo Oliveira (2015) nos últimos anos os suplementos alimentares e vitaminas tiveram um grande aumento em suas vendas. Por estes motivos, as empresas de suplementos ganham uma fatia maior de mercado e vêm crescendo de uma forma exponencial, fazendo-se mais presente no dia-a-dia das pessoas, tendo em seu portfólio produtos comercializados na forma de pó (*Whey Protein*, creatina, *Branched Chain Amino Acids* [BCAA que em português, significa Aminoácidos da Cadeia Ramificada]) e os encapsulados ou cápsulas de *Softgel* (BACURAU, 2009).

Apesar de serem cada vez mais utilizados, muitas questões importantes sobre a qualidade dos suplementos precisam ser respondidas. Por conta disso, o que se percebe é uma grande falta de informações sobre o assunto, ficando fácil entender as mais variadas dúvidas e questionamentos sobre esses produtos (BACURAU, 2009).

Por outro lado, o respeito aos padrões de qualidade impostos pelos órgãos responsáveis mostra credibilidade ao consumidor final e ainda oferece um maior retorno financeiro, ou seja, evita perdas e retrabalhos, resultando assim em um crescimento no potencial de vendas (BERTOLINO, 2010).

Para conseguir atingir um padrão de qualidade exigido pelos consumidores, o aprimoramento dos processos produtivos se torna fundamental, seja pela aquisição de um novo equipamento ou na automatização de determinada etapa produtiva. Assim o papel do engenheiro químico se torna importante nestas situações, pois um profissional capacitado e que entenda do processo, das operações unitárias envolvidas e do produto, pode suprir a necessidade de contratação de empresas externas que tenham esse *know-how* para implantação de um novo projeto. Pela gama de conhecimentos em operações unitárias, fenômenos físicos e químicos, termodinâmica, entre tantos outros, o engenheiro químico está capacitado para o desenvolvimento, automação, instalação e manutenção de equipamentos ou novos processos (FILIPPO FILHO, 2014).

Conforme Cremasco (2018), um processo muito importante dentro de uma indústria é o transporte de sólidos de um determinado ponto a outro. Esta operação pode ser utilizada em diversos setores, tendo grande destaque na fabricação de suplementos alimentares. Um dos exemplos mais importantes para transferência de sólidos é o transporte pneumático, no qual se utiliza geralmente ar como fluido de arraste, sendo muito utilizado em indústrias químicas, alimentícias, na produção de ferro, usinas termoeletricas, entre outras.

Neste sentido, o intuito do presente trabalho foi realizar o dimensionamento de um sistema de transporte pneumático de *Whey Protein* em uma indústria produtora de suplementos alimentares localizada no Vale do Taquari. Como esta é uma demanda atual do processo, este projeto será apresentado para a empresa em questão com a finalidade futura de aplicação do novo sistema proposto.

1.1 Justificativa

Devido à crescente demanda do mercado brasileiro por suplementos alimentares e a busca constante por melhorias em seus processos e qualidade dos seus produtos, a empresa em estudo, localizada no Vale do Taquari, pretende

investir em um novo sistema de transporte pneumático automatizado na área de produção para realizar o transporte do *Whey Protein* até a empacotadora, com o intuito de obter assim maior rendimento no envase dos produtos em um menor tempo. Esta modificação no processo visa além de aumentar a produtividade, reduzir gastos de fabricação, eliminar operações manuais realizadas atualmente no envase e diminuir a dispersão de pó pelo setor, resultando assim em menor probabilidade de contaminação cruzada e consequentemente maior qualidade do produto final.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em projetar um sistema de transporte pneumático automatizado para o processo de fabricação do *Whey Protein* em uma empresa de suplementos alimentares localizada no Vale do Taquari-RS.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para este trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o processo produtivo atual da empresa buscando os parâmetros necessários para o dimensionamento do transportador pneumático;
- b) Realizar o dimensionamento do sistema de transporte pneumático;
- c) Desenvolver um diagrama *P&ID* com o detalhamento de todos os instrumentos, válvulas e sistema de controle envolvidos;
- d) Realizar o levantamento de custos do projeto;
- e) Avaliar a nova capacidade produtiva, visando aplicação do projeto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria e Mercado dos Suplementos

Os países pioneiros na venda do suplemento *Whey Protein* foram Inglaterra e Itália em meados de 1650, no século XVII, e ambos vendiam o suplemento em sua forma líquida. Contudo, por falta de tecnologia e pesquisas na área, o produto apresentava altos índices de sódio, colesterol, gordura e lactose. Com o passar dos anos, em 1980, desenvolveu-se a técnica de microfiltração, que possibilitou reduzir o índice de alguns compostos indesejáveis e ainda elevar para 85% aproximadamente a concentração de proteínas no produto final. Já em 1993 nos Estados Unidos, a marca *Designer* se destacou por conseguir comercializar o suplemento *Whey Protein* em pó e com sabor (YANSEN, 2011).

Os suplementos alimentares surgiram no mercado diante das necessidades que alguns indivíduos apresentavam para suprir os nutrientes somente através da alimentação normal. Em meados de 1994, definiu-se pela *Food and Drug Administration* (FDA) que suplementos alimentares são produtos que contêm alguns desses ingredientes (minerais, ervas, vitaminas, enzimas, aminoácidos, etc), devendo ser ingeridos com a finalidade de complementar a dieta (VERONEZ, 2012).

O setor alimentício é um dos que mais utilizam *Whey Protein* na produção de bolos e pães, pois além de agir como antiaglutinante em misturas secas é também utilizado para aumentar o volume dos produtos. Já na produção de bebidas lácteas, a finalidade é o enriquecimento proteico (ZAVAREZE; MORAES; SALAS-MELLADO,

2010). E por último, em sobremesas e sorvetes, é utilizado para alcançar maior aeração, formando espumas estáveis (VIOTTO; MACHADO, 2007).

Conforme Almeida (2014), utiliza-se o *Whey Protein* também para o setor *fitness*, no desenvolvimento de produtos com altas concentrações de proteínas e baixa caloria para indivíduos com restrições alimentares. Segundo Haraguchi, Abreu e Paula (2006), esses produtos contêm altos valores nutricionais e teor elevado de aminoácidos, que são essenciais para a formação dos músculos, além de proporcionar um aumento na síntese proteica e na diminuição da gordura corporal.

De acordo com a pesquisa da Associação Brasileira da Indústria de Alimentos para Fins Especiais e Congêneros (ABIAD) realizada em 2016, em torno de 54% dos brasileiros possuem suplementos alimentares em casa, sendo a principal razão para isso a necessidade de complementar a dieta e promover o bem-estar (SOUZA, 2018).

Com relação ao setor financeiro no Brasil, os suplementos alimentares ocasionaram crescimento econômico médio de 27% nos últimos 6 anos, movimentando em torno de 1,5 bilhões de reais. Já nos Estados Unidos, onde o setor é mais forte, tem-se um faturamento próximo de US\$ 3,9 bilhões por ano, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Produtos Nutricionais (Abenuutri) (FECOMERCIO SP, 2016), o que coincide com os dados relatados por Souza (2018), no qual a busca pela qualidade de vida, juntamente com uma dieta equilibrada, gera receita ao setor de suplementos.

Complementando as estatísticas sobre o mercado mundial de suplementos, em 2018 a *Zion Market Research* publicou uma matéria, trazendo informações e dados financeiros deste setor a partir de 2017, o qual mostrou que este período movimentou cerca de US\$ 28 bilhões, podendo chegar a US\$ 44 bilhões até 2024, com um crescimento de 5,71% entre 2018 e 2024 (ZION MARKET RESEARCH, 2018).

2.2 Operações Unitárias na Engenharia

O trabalho do engenheiro químico, na maioria das vezes está relacionado com a escolha das etapas apropriadas e ordem adequada para um processo capaz de concretizar uma operação, uma purificação ou uma separação química. Já os

processos químicos são formados por várias etapas diferentes, que tem princípios independentes da substância que está sendo operada e de outras características do sistema, podendo ser estudados individualmente. Por isso o engenheiro químico tem versatilidade em decompor um processo complicado em etapas físicas individuais, denominadas operações unitárias (FOUST; WENZEL; CLUMP, 2013).

As operações unitárias por sua vez, abrangem um grande conjunto de conhecimentos, entre os quais podem-se citar o transporte de vapor, gás, líquido e mistura de gases e líquidos, transporte de sólidos e de mistura sólido-fluido. Também quando se trabalha com processos envolvendo sólidos se destaca a caracterização de partículas, tais como diâmetro, porosidade, esfericidade e distribuição granulométricas (CREMASCO, 2018).

Para Tadini et al. (2016), as operações unitárias mais relevantes na indústria de alimentos são: processamento térmico, transporte de fluidos e sólidos, evaporação, secagem, extração, destilação, filtração, sedimentação, centrifugação, peneiramento, redução de tamanho e caracterização da partícula.

Em empresas de suplementos alimentares, existem diversas etapas no processo de fabricação que envolvem algumas operações unitárias, como misturadores, bombas e compressores, tanque de armazenamento e empacotadora, além dos sistemas de transporte de materiais e produtos, dentre os quais pode-se destacar o transportador pneumático (OLIVEIRA et al., 2018).

2.3 Caracterização de Partículas

Independente do campo da engenharia a ser percorrido (química, de alimentos, de materiais e de minas), conhecer as características de um sistema poroso é essencial. Na engenharia química, por exemplo, informações sobre as partículas são fundamentais no desenvolvimento de equipamentos e simulação de processos de várias operações unitárias, como operações de transporte, filtração, centrifugação, sedimentação entre outros (TADINI et al., 2016).

Conforme Telis-Romero, Viganó e Moser (2016), em indústrias de alimentos existem vários sistemas porosos, como o grupo de farinhas, os açúcares, as misturas de sólidos granulares, como achocolatados e sopas, enquadrando-se também neste contexto os suplementos alimentares. Também existe uma grande

diversidade de grãos como, arroz, feijão, trigo entre outros, sendo realizada a caracterização destes materiais através do seu tamanho, densidade e forma, ou também pela partícula disposta em conjunto ou isolada, conhecida como leito de partículas.

Independente do processo, o conhecimento das propriedades morfológicas e físicas da partícula, como porosidade, tamanho, área superficial e massa específica é de extrema importância no dimensionamento de transportadores pneumáticos, uma vez que tais sistemas são regidos pela interação partícula-partícula ou partícula-fluido. Além disso, esse conhecimento permite a abertura para o desenvolvimento de novas tecnologias no que se refere a sistemas particulados (CREMASCO, 2018).

2.3.1 Tamanho da Partícula

O tamanho das partículas é um fator determinante no dimensionamento de equipamentos e sistemas particulados. Os diâmetros podem variar na faixa de 18 mm a 0,01 mm, indo desde uma uva usada para produzir passas até partículas muito pequenas como de amido. Nesta faixa de tamanho, as partículas são maiores que a maioria das moléculas e partículas coloidais, entretanto, são pequenas o suficiente para estarem presentes em grande número juntas. Em indústrias de alimentos, as operações, na maior parte das vezes, envolvem sistemas porosos com enormes quantidades de partículas, assim, para realizar o dimensionamento dos equipamentos é fundamental conhecer as características das partículas e dos processos (TELIS-ROMERO; VIGANÓ; MOSER, 2016).

No entanto para determinar o diâmetro de partícula com mais exatidão, existem algumas técnicas que podem ser usadas (CREMASCO, 2018). O Quadro 1 mostra algumas das técnicas mais comuns para determinação de tamanho de partículas.

Quadro 1 - Técnicas mais comuns de determinação de diâmetro de partícula

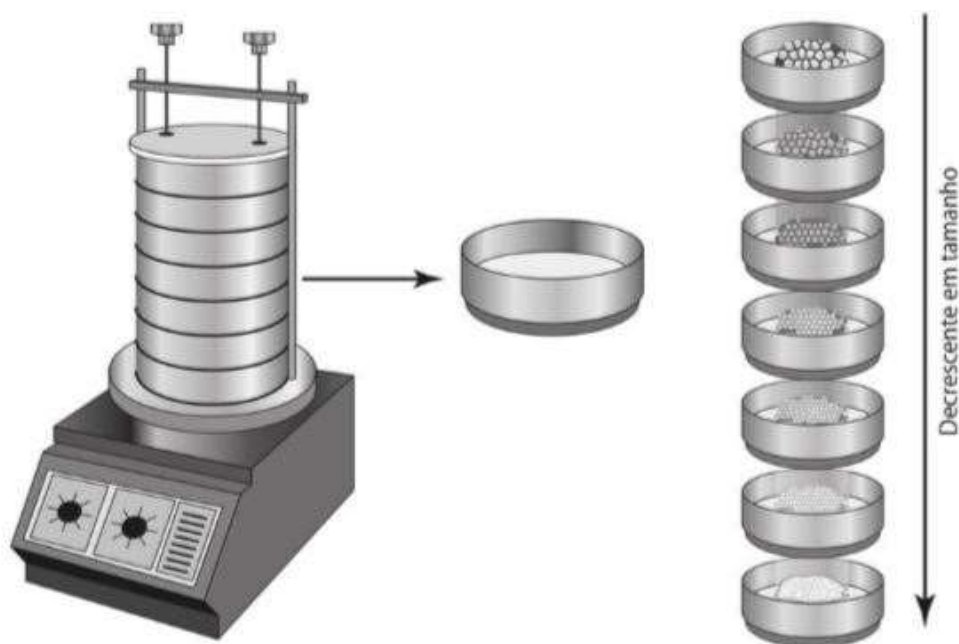
Técnica	Descrição	Faixa de Tamanho (μm)
Peneira	Peneiramento por agitação mecânica ou ultrassônica	20 – 100.000
	Micropeneiramento	5 – 50
Sedimentação	Gravimetria	1 – 250
	Centrífuga	0,05 – 60
Microscopia	Eletrônica (MEV)	0,01 – 1
	Óptica	0,2 – 50
Turbidimetria	Atenuação da intensidade de luz	0,05 – 500
Resistividade	Contador <i>Coulter</i>	0,5 – 800
Elutriação	Escoamento de fluido	5 – 50
Permeabilidade	Fischer <i>Subsieve</i> (fluxo de ar por orifício calibrado)	0,2 – 50
Área Superficial	Absorção de Gás	0,01 – 20
	Penetração de Líquido	0,01 – 50

Fonte: Oliveira Filho (2007, p. 31).

Telis-Romero, Viganó e Moser (2016) também salientam uma variedade de métodos que podem ser utilizados para obter o tamanho das partículas, como o peneiramento através da série de peneiras Tyler, uso de um software acoplado ao microscópio, que possibilita a coleta de imagem e a medida da partícula ao mesmo tempo, além do método de difração a laser que funciona com um sistema ótico de feixes de luzes.

Entre todas as técnicas e métodos, uma técnica simples e muito utilizada para determinar o diâmetro da partícula é o peneiramento. Nesta opção, faz-se passar uma amostra do material através de várias peneiras em série, avaliando a massa do material retido em cada peneira. Ao alimentar a primeira peneira, uma quantidade poderá ficar retida e o restante oriundo da primeira etapa atravessa, ficando retida na segunda peneira, enquanto uma parte segue para a terceira peneira e assim sucessivamente (GOMIDE, 1983; CREMASCO, 2018). A Figura 1 mostra um sistema de análise granulométrica de partículas usando a série de peneiras Tyler.

Figura 1 – Representação de um grupo de peneira da série Tyler sobre um agitador magnético



Fonte: Cremasco (2018).

Para Cremasco (2018), as aberturas nas peneiras podem ser dadas em milímetros ou em mesh, que representa a quantidade de abertura por polegadas lineares. Também existe uma relação entre *mesh* e micrômetro, que pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre *mesh* e abertura de μm para peneiras da série Tyler

Mesh	μm	Mesh	μm
10	2.000	60	250
12	1.680	70	210
14	1.410	80	177
16	1.190	100	149
18	1.000	120	125
20	841	140	105
25	707	170	88
30	595	200	74
35	500	230	63
40	420	270	53
45	354	325	44
50	297	400	37

Fonte: Cremasco (2018, p. 143).

De acordo com Gomide (1983), ao término do ensaio para determinar a fração retida pelo método de peneiras, as quantidades acumuladas nas diversas peneiras são pesadas e as diversas frações retidas são então calculadas, dividindo as várias massas retidas pela massa total. Se as peneiras forem numeradas, iniciando pela primeira superior e denominando por m_i a massa retida sobre a peneira i e M a massa total da amostra, a fração retida pode ser indicada pela Equação 1:

$$\Delta\varphi_i = \frac{m_i}{M} \quad (1)$$

Onde:

$\Delta\varphi_i$ = fração retida;

m_i = massa retida sobre a peneira i ;

M = massa total da amostra.

Ao utilizar a análise granulométrica diferencial, supõe-se que as partículas das frações tenham o mesmo tamanho, que é a média aritmética das aberturas das malhas cuja fração ficou retida entre duas peneiras. Já ao utilizar a análise acumulada, a relação entre o diâmetro da partícula (D_i) e fração acumulada retida (φ) apresenta resultados mais exatos (GOMIDE, 1983).

Segundo Gomide (1983), os parâmetros de diâmetro de partículas são de extrema importância, pois são usados nos cálculos de perda de carga em sistema de transporte pneumáticos e facilitam o estudo de escoamento de fluídos. Os diferentes tipos de diâmetros de partículas podem ser obtidos conforme as Equações 2 a 5:

$$\overline{Da} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\varphi_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\varphi_i}{D_i^3}} \quad (2)$$

$$\overline{Ds} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\varphi_i}{D_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\varphi_i}{D_i^3}}} \quad (3)$$

$$\overline{D_v} = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i^3}}} \quad (4)$$

$$D_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\phi_i}{D_i}} \quad (5)$$

Onde:

$\overline{D_a}$ = diâmetro médio aritmético (mm);

$\overline{D_s}$ = diâmetro médio superficial (mm);

$\overline{D_v}$ = diâmetro médio volumétrico (mm);

D_p = diâmetro de Sauter (mm);

D_i = diâmetro de partícula (mm);

$\Delta\phi_i$ = fração retida.

2.4 Transporte de Sólidos

Para Cremasco (2018), transporte de sólidos é o arraste de um material presente em uma coluna ou tubulação por meio da ação de uma fase fluida, sendo uma operação utilizada em diversos processos industriais. Como exemplo pode-se citar o transporte pneumático, no qual se utiliza geralmente ar como fluido de arraste, sendo usado em indústrias químicas, alimentícias, de produção de ferro, usinas termoelétricas, entre outras. Já o transporte hidráulico, no qual o fluido é normalmente água, pode ser encontrado em indústrias químicas, na mineração de fosfato, beneficiadoras de areia e no processamento de lixo.

De acordo com Mills (2015), diversos segmentos no ramo industrial possuem processos que envolvem a transferência de materiais manuseados na forma de pó ou granular. Entre os diversos materiais a granel transportados estão os produtos agrícolas, minérios, produtos químicos, produtos farmacêuticos, além de produtos usados na fabricação de tintas e refino e processamento de metais. Na agricultura, são manuseados grandes volumes de materiais colhidos, como grãos e materiais processados para ração animal. Uma vasta gama de produtos alimentares, como farinha, açúcar, chás e café também podem ser transportados em vários processos de fabricação de alimentos. Já em indústrias químicas e petroquímicas incluem-se

materiais como carbonato de sódio, polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), polipropileno (PP) e outros materiais, em uma ampla variedade de formas, que variam desde pós finos até grãos maiores.

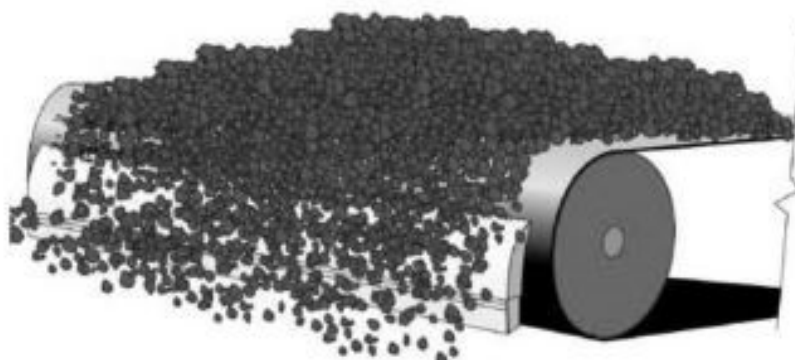
Segundo Gomide (1983), o transporte deve ser realizado de acordo com o tipo de material a ser transportado e deve também levar em consideração fatores como custo operacionais e de aquisição, necessidade de mão de obra, custo de espaço e manutenção. Indiferentemente do tamanho da empresa, seja de pequeno, médio ou grande porte, o estudo do transporte dos sólidos tem grande valor e importância, pois além de facilitar o processo produtivo, ganhando agilidade, proporciona uma redução de custo e melhoria na qualidade do produto final.

Para Telis-Romero, Viganó e Moser (2016), os diversos tipos de sólidos nas indústrias podem ser transportados de várias formas, sendo os mais usados o transporte pneumático, hidráulico, mecânico por correia, elevação de balde, esteira, helicóide e por vibração.

2.4.1 Transportador por Esteira

Seu funcionamento é simples, no qual uma correia sem fim movimenta-se por cima de uma esteira apoiada em roletes. Esta correia necessita de esticadores para ficar firme e sob tensão. Sua extensão pode ser com inclinações ou totalmente horizontais, que vão desde pequenas distâncias até quilômetros, com velocidades que podem ser baixas ou altas. Os materiais de fabricação das esteiras geralmente podem ser borrachas, *nylon*, couro, PVC ou poliéster. Entretanto, por ser um sistema aberto, pode ocasionar transbordamento de partículas transportadas para as laterais, acúmulos sobre a esteira ou até mesmo gerar dispersão de poeiras no ar, se o material conter partículas muito finas (TEIXEIRA, 2019). A Figura 2 mostra uma imagem de um tipo de transportador por esteira.

Figura 2 – Transportador por esteira

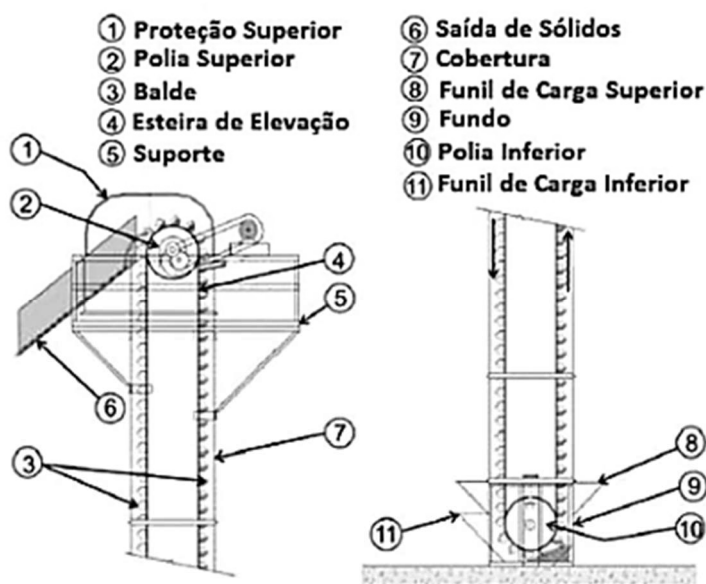


Fonte: Teixeira (2019).

2.4.2 Transporte por Elevação de Balde

O transporte por elevação de balde é geralmente utilizado para movimentar materiais para destinos verticais, tendo uma estrutura giratória no qual vários baldes estão presos em uma esteira que trabalha com energia motriz fornecida por um motor. Ao chegar na parte inferior, os baldes realizam a coleta das partículas e giram subindo até o topo, liberando as partículas na parte superior (MILLS, 2015), conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Transportador por elevação de baldes



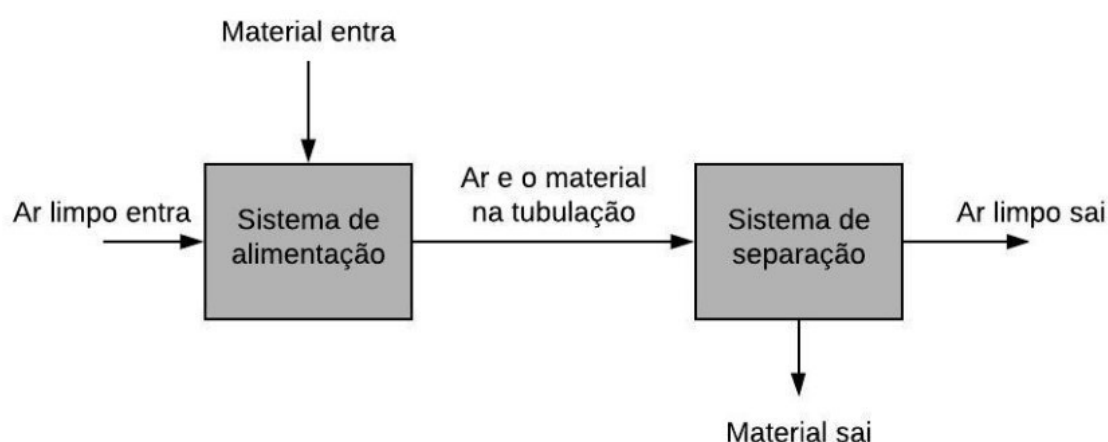
Fonte: Teixeira (2019).

As vantagens desse modelo estão relacionadas com a possibilidade de trabalhar com altas vazões, pela simplicidade do transporte e pelo fato do sistema poder ser fechado, reduzindo problemas com o meio externo. No entanto, algumas desvantagens podem ser citadas, como as altas frequências de manutenção e velocidades de atuação baixa, as quais não são recomendadas para materiais úmidos, pois estes podem ficar grudados no balde e consequentemente diminuir o rendimento (TEIXEIRA, 2019).

2.4.3 Transportadores Pneumáticos

Os sistemas de transporte pneumático são particularmente versáteis. Uma grande variedade de materiais pode ser manuseada, sendo totalmente fechados pelo sistema e tubulações. Isso significa que materiais potencialmente perigosos podem ser transportados com bastante segurança à um risco mínimo de geração de poeira e, portanto, esses sistemas geralmente atendem aos requisitos de qualquer legislação local de saúde e segurança com pouca ou nenhuma dificuldade (BORTOLAIA; ANDRIGHETTO; BENATTI, 2008). A Figura 4 apresenta um fluxograma simplificado dos elementos básicos de um sistema de transporte pneumático.

Figura 4 – Fluxograma simplificado dos elementos básicos de um sistema de transporte pneumático



Fonte: Adaptado de Mills (2015).

Para Bhatia (2010), um sistema de transporte pneumático é um processo pelo qual os materiais a granel são transferidos ou injetados com uso de um fluxo de gás como meio de transporte de uma ou mais fontes para um ou mais destinos. O ar é o gás mais comumente utilizado, mas não pode ser selecionado para uso com materiais reativos onde possa haver risco de explosão provocado pela geração de poeira.

Como vantagens deste tipo de sistema de transporte, pode-se citar o fato de que os transportadores pneumáticos ocupam pouco espaço na superfície, podendo direcionar as tubulações para paredes, através de telhados ou até no subsolo, evitando assim contato com equipamentos ou estruturas existentes. As dobras dos tubos na linha de transporte fornecem essa flexibilidade, porém aumentam a resistência geral da tubulação e também podem adicionar problemas, como de degradação de partículas ou sofrer desgaste erosivo se o material for muito abrasivo (MILLS, 2015).

Para Klinzing et al. (2010), as principais vantagens do transporte pneumático estão na movimentação de uma variedade de materiais sem liberação de poeira, flexibilidade de instalação, distribuição das tubulações de transporte do sólido para qualquer lugar da fábrica, não exigindo manutenções caras, possibilitando seu uso para transportar produtos de valores elevados em função de sua segurança, versatilidade para uso com vários tipos de produtos e transporte do material por grandes distâncias. Já como desvantagens, mencionam o alto custo inicial para instalação, elevado consumo de energia, além da possibilidade de apresentar degradação das partículas e desgaste de equipamentos.

O sistema pneumático de transporte, oferece uma grande maleabilidade ao processo, ou seja, com uma escolha e disposição adequadas de equipamentos, os materiais podem ser transportados de uma tremonha ou silo para vários outros locais. É possível uma flexibilidade considerável no layout e na operação da planta, de modo que a alimentação de múltiplos pontos, pode ser transformada em uma linha comum e uma única linha pode ser descarregada em várias tremonhas ou silos receptores (SILVA, 2005).

Para Mills (2015), às tubulações também podem ser instaladas horizontalmente, assim como verticalmente para cima e para baixo, e ainda se houverem dobras nas tubulações, qualquer combinação de orientações pode ser acomodada em um único trecho do sistema. Transportar materiais verticalmente por

grandes distâncias não representa nenhum problema, pois as taxas de fluxo de material na entrada e saída podem ser controladas facilmente e monitoradas, e a maioria dos sistemas pode ser projetado para operações totalmente automatizadas.

De acordo com Silva (2005), um sistema de transporte pneumático bem projetado é geralmente um método mais prático e econômico de transportar materiais de um ponto para outro do que sistemas mecânicos alternativos (transportadores de correia, transportadores de parafuso, transportadores por vibração, transportadores de arrasto e outras metodologias) por três razões principais:

- a) São relativamente econômicos quanto a instalação e operação;
- b) São totalmente fechados e, se necessário, podem operar inteiramente sem que as partes móveis entrem em contato com o material transportado. Sendo fechados, são relativamente limpos, mais ambientalmente aceitáveis e de simples manutenção;
- c) São sistemas flexíveis em termos de redirecionamento e expansão, podendo transportar um produto para vários locais da planta.

O sistema de transporte pneumático envolve além das tubulações de transporte, uma série de componentes e sistema auxiliares que exercem funções essenciais no processo, como válvulas rotativas, coletores, compressores ou equipamento geradores de vácuo (BORTOLAIA; ANDRIGHETTO; BENATTI, 2008; DICKNOW, 2013).

2.4.3.1 Válvulas para Sistemas de Transporte Pneumático

Entre os diversos tipos de válvulas disponíveis atualmente no mercado, as mais adequadas para sistemas de transporte pneumático são as válvulas rotativas e válvulas solenoides, por serem relativamente simples e eficientes.

A válvula rotativa é o tipo de alimentador mais utilizado no transporte pneumático, também conhecida como alimentador rotativo. Esse modelo permite que os sólidos sejam alimentados a uma taxa controlada no fluxo de ar. Consiste em um rotor dividido geralmente em oito palhetas, onde o material a ser alimentado, flui por gravidade para dentro do rotor, as pás por sua vez, giram e o produto cai para dentro da tubulação que segue então o fluxo de ar do transportador (MILLS, 2015).

Segundo Rosso (2018), as válvulas rotativas são compostas por um eixo horizontal com pás, desenvolvidas com materiais como aço carbono, ferro fundido, alumínio e inox, podendo ser utilizadas para dosagem, transporte pneumático, descarga em ciclones ou filtros de mangas.

Já as válvulas solenoides possuem a capacidade de direcionar ou bloquear a passagem do fluido, sendo amplamente utilizadas para aplicações de automação em diversos ramos industriais. Este tipo de válvula possui dois componentes principais, a estrutura (corpo da válvula) e uma bobina (solenóide). Seu funcionamento se dá pelo recebimento de tensão (volts) na bobina, energizando-a e provocando o deslocamento mecânico desta bobina em seu interior. A compressão de uma mola desloca a bobina para uma nova posição atuando na válvula, e quando a corrente elétrica é bloqueada retorna para a posição inicial. Esta mudança de posição da válvula é o que libera e interrompe a passagem do fluido (ar comprimido, água ou vapor) (SILVA, 2005; FREITAS et al., 2016).

2.4.3.2 Equipamento de Vácuo

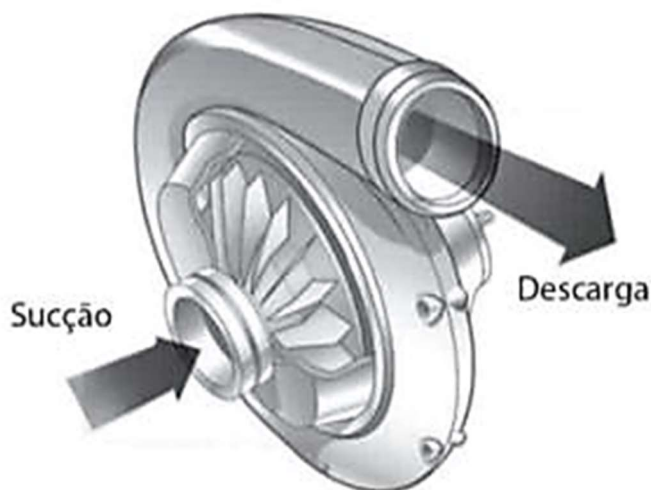
Para Cremasco (2018), os equipamentos de vácuo, também conhecidos como compressores, sopradores ou ventiladores, são utilizados para transformar energia mecânica em movimento dos fluidos. A diferença entre os equipamentos é a capacidade de compressão, no qual os ventiladores provocam um pequeno aumento de pressão de até 0,03 atm, os sopradores até 0,3 atm e os compressores podem gerar um aumento de pressão de milhares de atmosferas.

Os sopradores são comumente usados na manipulação de diversos gases em processos químicos, alimentícios e farmacêuticos. Já os ventiladores são mais usados em sistemas de condicionamento de ar em indústrias, comércios e ambientes residenciais. Por fim os compressores, são os mais utilizados em diversos tipos de serviços, podendo ser de pequeno ou grande porte, sendo usados desde aplicações simples como máquinas de pinturas pneumáticas até transporte de gases em indústrias químicas e petroquímicas (CREMASCO, 2018).

Os compressores realizam a sucção do ar pelo rotor e descarregam pelo bocal de descarga. Estando o ar limpo e sem impurezas, o rendimento do sistema pode chegar em torno de 70% a 90%, porém se houver a presença de poeiras ou

partículas sólidas maiores este rendimento pode sofrer uma queda de até 50% (SILVA, 2005). A Figura 5 apresenta a imagem ilustrativa de um compressor.

Figura 5 – Imagem ilustrativa de um compressor centrífugo



Fonte: Adaptado de Cremasco (2018, p. 80).

2.4.3.3 Tubulações

Para realizar a escolha da tubulação correta, deve-se levar em consideração alguns fatores essenciais que fazem diferença no rendimento do sistema pneumático, tais como velocidade de escoamento do ar, abrasividade do produto, vazão de ar e do sólido a ser transportado (TELIS-ROMERO; VIGANÓ; MOSER, 2016).

Conforme Mills (2015), às decisões relacionadas à especificação de componentes para sistemas de transporte pneumático não terminam com a válvula rotativa de alimentação, o compressor e o sistema de filtragem. A tubulação é igualmente importante e alguns tópicos precisam ser levados em consideração como o tipo de material a ser transportado, espessura da parede do tubo, acabamento superficial e degraus ou dobras a serem utilizados. Um dos parâmetros mais críticos em relação à operação bem-sucedida de um sistema de transporte pneumático também é manter um valor mínimo de velocidade do ar de transporte para o material a ser manuseado.

Conforme Dicknow (2013), se um material abrasivo for transportado, um desgaste da tubulação deve ser esperado e para proporcionar uma vida útil mais

longa à tubulação, deve-se usar tubos com uma espessura de parede maior ou de aço macio, pois são particularmente vulneráveis a esse tipo de desgaste. Já se o material a ser transportado não for abrasivo, uma tubulação de paredes finas deve ser adequada para o serviço. Entretanto, se há a necessidade de maior flexibilidade da tubulação, podem ser usadas mangueiras de borrachas que são ótimas para realizar combinações entre tubos retos e curvas, podendo ser encontradas na forma de borracha natural ou sintéticas e em uma ampla variedade de tamanhos.

2.4.3.4 Coletores (Empacotadora)

Para Mills (2015), os coletores são utilizados para recolher o material que foi transportado no final da linha e existem diferentes tipos de dispositivos para essa finalidade. Quando os materiais são menores de 5 μm , geralmente se utiliza os coletores do tipo filtro de mangas ou ciclones, entretanto, se o material tiver diâmetro maior, utilizam-se câmaras gravitacionais.

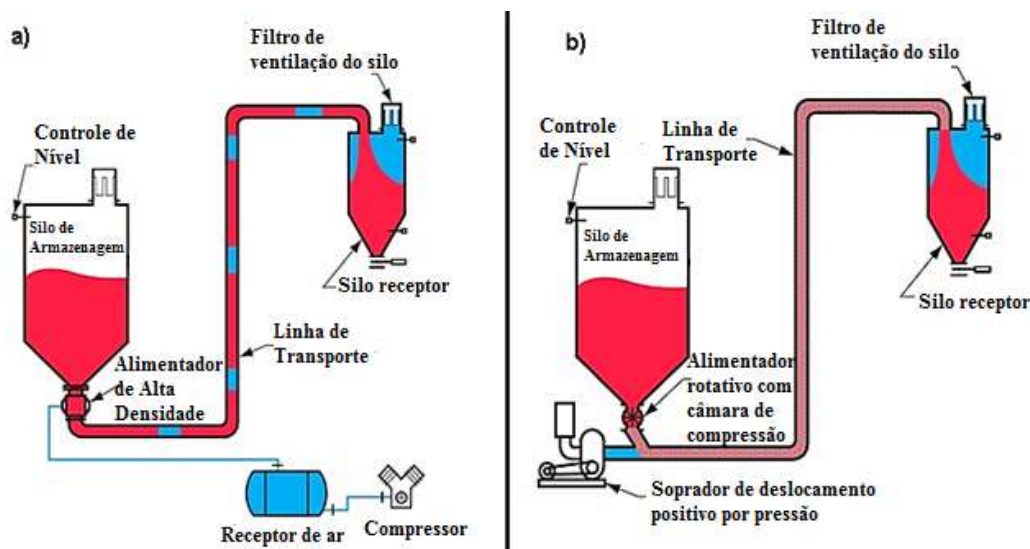
No caso de empresas de suplementos alimentares, normalmente não é utilizado coletor e sim um equipamento empacotador no final do processo, onde o material, é descarregado e alimentado à uma empacotadora, com um sistema de dosagem automática liberando o peso configurado no painel de controle. As empacotadoras têm capacidade de trabalhar 24 horas e contam com peças de alta robustez e durabilidade, o que resulta em maior economia pois geram menos manutenção e um elevado rendimento de produção (OLIVEIRA et al., 2018).

2.4.3.5 Características e Configurações de Transportadores Pneumáticos

Os sistemas de transporte pneumáticos podem ser caracterizados de acordo com seu modo de operação, podendo ter a característica de fase diluída ou fase densa, sistema direto ou indireto e ainda variar quanto a pressão, podendo operar com pressão positiva, negativa ou combinada. Essas configurações podem variar de acordo com tipo de material a ser transportado, distância a ser percorrida ou local de descarga (KLINZING et al., 2010).

Dependendo da velocidade superficial do gás, da pressão e da relação entre o material e o fluido na tubulação, pode-se classificar o transporte pneumático em fase densa ou diluída. A Figura 6 mostra o funcionamento destes dois sistemas.

Figura 6 – Sistema de transporte pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b)



Fonte: Dynamic Air® (2018).

Se o material é transportado em suspensão no ar através da tubulação, é chamado de transporte em fase diluída. Se o material é transportado em baixa velocidade em um modo sem suspensão, através de toda ou parte da tubulação, é chamado de transporte em fase densa (CREMASCO, 2018).

De acordo com Mills (2015), quase todo material pode ser transportado em fase diluída, com fluxo de suspensão através de uma tubulação, independentemente do tamanho, forma ou densidade das partículas. É frequentemente chamado de fluxo de suspensão porque as partículas são mantidas em suspensão no ar. É necessária uma velocidade relativamente alta (entre 12 m/s para um pó fino, a 16 m/s para um material granular fino) e, portanto, os requisitos de energia também podem ser altos, mas praticamente não há limite para a gama de materiais que podem ser transportados. Com partículas muito pequenas, haverá poucos impactos, porém com partículas grandes e peso consequentemente maior, há a ação da força gravitacional e estas tendem a vibrar nos dutos horizontais.

Já o transporte em fase densa é geralmente chamado de fluxo sem suspensão, no qual o material é transportado em forma de blocos separados por intervalos de ar, no qual a velocidade do ar pode ser inferior a 3 m/s em

determinadas circunstâncias. A movimentação do fluxo do leito só é possível em um sistema de transporte convencional se o material a ser transportado apresentar boas características de retenção de ar. Esse tipo de fluxo é tipicamente limitado a materiais em pó muito finos, com um tamanho médio de partícula na faixa de aproximadamente 40 a 70 μm , dependendo da distribuição do tamanho e do formato da partícula (MILLS, 2015).

Entre as opções de transporte pneumático em fase densa ou diluída, existem ainda dois tipos de sistema que podem ser usados, o direto e o indireto. O sistema direto é quando o sólido passa pelo ventilador (compressor) e segue o caminho pela tubulação, já no sistema indireto, o sólido transportado não passa pelo compressor. Entre estes dois sistemas, o mais utilizado é o direto, pois seu projeto e instalação são menos complicadas do que o indireto. No entanto, a desvantagem é que determinados materiais podem danificar o ventilador provocando quebra e desgaste do seu rotor e paredes internas (SILVA, 2005).

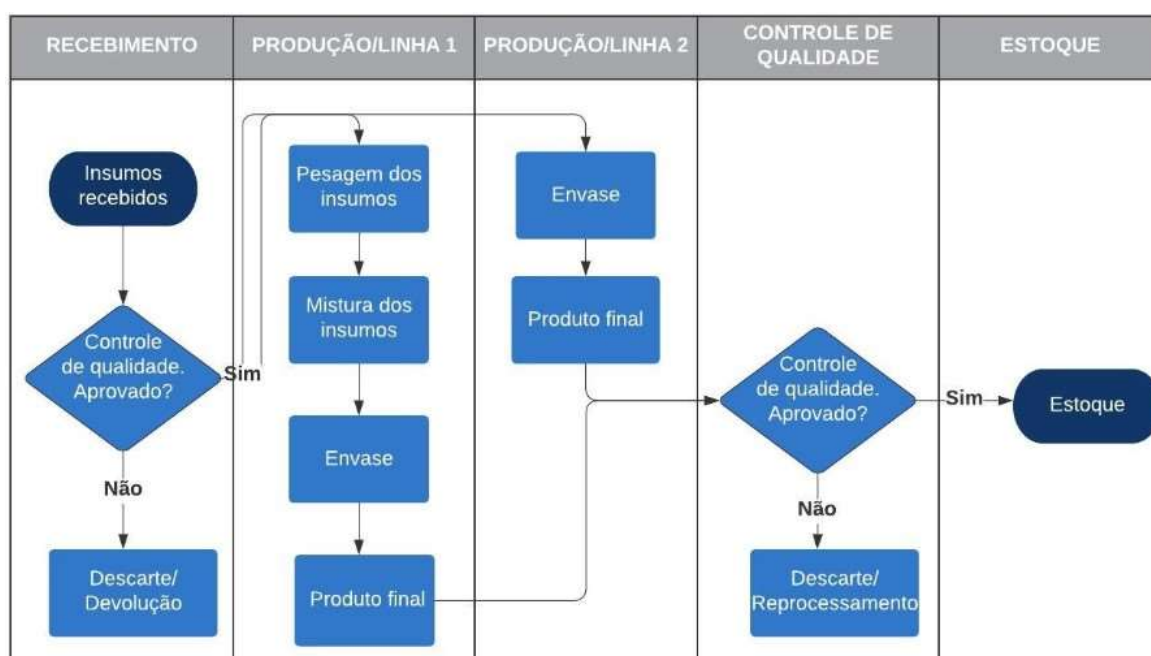
Para Klinzing et al. (2010) os sistemas de transporte pneumáticos também podem ser classificados quanto a pressão que será exercida na tubulação, ou seja:

- a) Pressão negativa (Vácuo): quando se utiliza máquina geradora de vácuo no final da linha;
- b) Pressão positiva (Pressão): quando se utiliza máquina geradora de ar no início da linha;
- c) Pressão positiva e negativa (combinado): quando se utiliza máquina geradora de ar no início da linha e máquina geradora de vácuo no final da linha combinado.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em uma empresa de suplementos alimentares, localizada no Vale do Taquari, na cidade de Estrela/RS. Para um entendimento geral do processo produtivo da empresa em estudo, a Figura 7 apresenta um fluxograma demonstrando as etapas de produção.

Figura 7 – Fluxograma de fabricação de suplementos alimentares usados na empresa



Fonte: Do Autor (2020).

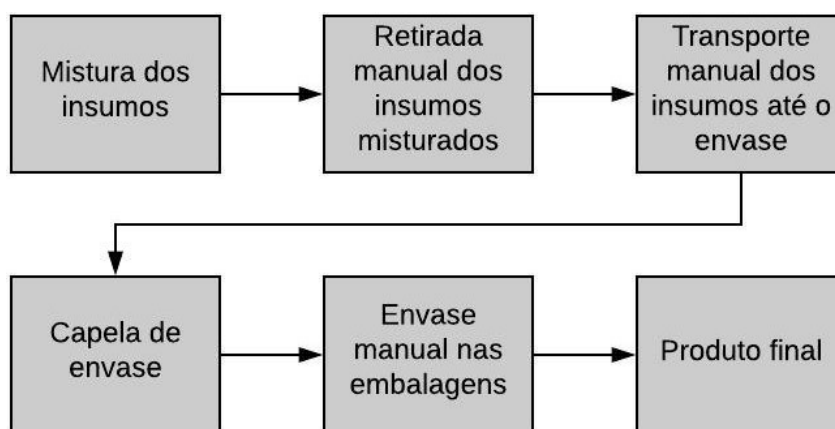
A empresa possui mais de 50 produtos em seu portfólio, sendo que 1/3 dos produtos são fabricados na própria empresa e o restante apenas embalado com a

marca. Dos suplementos que são fabricados na empresa, o foco principal está no *Whey Protein*, pois apresenta maior demanda de venda e com isso de fabricação. A proposição deste trabalho se enquadra entre a etapa de mistura dos insumos e o envase da Linha 1 de produção, processo que atualmente consome maior tempo de fabricação.

3.1 Sistema de Produção Atual

Na etapa de produção dos suplementos existem duas linhas de produção, denominadas Linha 1 e 2. Na Linha 2 a matéria-prima chega na empresa e é envasada diretamente na embalagem, apresentando assim maior rendimento e agilidade. Já a Linha 1 possui um gargalo no sistema de transporte dos insumos misturados até o envase, pois atualmente ocorre de forma manual, sendo um processo ineficiente, demorado e prejudicial à ergonomia dos trabalhadores. Esta etapa de transporte e envase do *Whey Protein* realizado pela empresa pode ser representado pelo fluxograma mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do processo de envase do *Whey Protein* utilizado atualmente pela empresa



Fonte: Do Autor (2020).

Atualmente, para a fabricação dos produtos, os insumos já pesados são adicionados dentro de um misturador horizontal *Ribbon Blender* que possui capacidade para 250 kg/batelada confeccionado em aço inox 304. O misturador conta com eixo transversal helicoidal e motor cuja potência é de 3 HP. Ao finalizar o

tempo de mistura dos insumos, para retirar a mistura do equipamento o operador do processo precisa acoplar uma sacaria abaixo do misturador, abrir uma válvula borboleta, esperar encher a embalagem e fechar a válvula. Após, retira-se manualmente a embalagem debaixo do misturador e posiciona-a dentro de uma capela onde ocorre o envase do produto nas embalagens finais. A Figura 9 demonstra estes dois processos.

Figura 9 – Esquema de coleta do material do fundo do misturador *Ribbon Blender* (a) e capela para envase dos insumos misturados dentro das embalagens (b)



Fonte: Do Autor (2020).

Após a mistura ser coletada do misturador é acondicionada na capela e pode ser iniciado o envase manual para as embalagens finais de armazenagem dos suplementos. Com auxílio de uma concha e uma balança semi-analítica, o *Whey Protein* é retirado da sacaria e adicionado dentro da embalagem até atingir o peso ideal, conforme mostrado no esquema da Figura 10.

Figura 10 – Etapa de envase do *Whey Protein* nas embalagens finais do produto



Fonte: Do Autor (2020).

3.2 Análise das Características do *Whey Protein*

A análise das características do material a ser transportado é de grande importância, pois estão diretamente ligadas aos cálculos de dimensionamento do transportador pneumático (CREMASCO, 2018). Por este motivo, foram coletadas amostras do *Whey Protein* para realizar a análise granulométrica e determinar a massa específica do material $\rho_{pa}(t/m^3)$. O material foi coletado dentro do misturador após finalizado o processo de mistura dos insumos, retirando 3 amostras de pontos diferentes do misturador, nas extremidades e no meio.

A análise granulométrica foi realizada utilizando peneiras da série Mesh *Tyler* nos seguintes *mesh* (65, 80, 100, 150, 170 e 250), usando uma plataforma vibratória para a separação dos grânulos do *Whey Protein*. A amostra ficou no aparelho em torno de 10 minutos até que a massa presente em cada peneira fosse constante, conforme trabalho de Monge Neto (2013). As análises das amostras foram realizadas em triplicata nos laboratórios do Prédio 8 da Universidade do Vale do Taquari – Univates. Já para a determinação da massa específica, baseou-se em

laudos internos realizados pelo controle de qualidade da própria empresa em estudo, no qual utilizou-se para tal análise 3 amostras do material e com o auxílio do densímetro da marca *PowderMix* foi possível determinar a massa específica de cada amostra e em seguida foi realizado a média dos valores encontrados.

3.3 Dimensionamento do Transportador Pneumático

Para o dimensionamento do sistema de transporte é necessário que se tenha conhecimento de algumas especificações do processo e do material, como capacidade do sistema C (t/h) e diâmetro médio de Sauter D_p (mm), sendo este último calculado com a Equação 5 e com os dados coletados da análise granulométrica. Após a coleta destes dados para os cálculos deve-se definir o layout do sistema que será dimensionado, ou seja, trechos de tubulações, quantidades de válvulas, compressor e equipamento coletor para o transporte pneumático.

Segundo Gomide (1983), algumas outras variáveis importantes também são necessárias para os cálculos, como a perda de carga do sistema ΔP (kg/m²), o diâmetro do transportador D_t (mm), a vazão do ar que será transportado Q_g (m³/s), a potência total do compressor P_v (HP) e a velocidade de transporte V_t (m/s).

Todas as equações que irão nortear o desenvolvimento do projeto são baseadas no livro de operações unitárias (GOMIDE, 1983). Primeiramente inicia-se definindo a velocidade de transporte utilizando as características das partículas do material, conforme mostra a Equação 6, e após pode-se calcular o diâmetro do transportador, por meio da Equação 7.

$$V_t = 4,11^3 \sqrt{\rho_{pa}} \sqrt{D_p} + 23,4 \sqrt{\rho_{pa}} \quad (6)$$

Onde:

V_t = velocidade de transporte (m/s);

ρ_{pa} = massa específica do material (t/m³);

D_p = diâmetro médio de Sauter (mm).

$$D_t = 3016 \frac{\sqrt{C}}{V^{0,98}} \quad (7)$$

Onde:

D_t = diâmetro do duto (mm);

C = capacidade do sistema (t/h);

V_t = velocidade de transporte (m/s).

Em seguida define-se a perda de carga por atrito na tubulação de transporte, através da Equação 8, que é necessária para determinar a perda de carga total.

$$\frac{\Delta P}{L_t} = 1,68(X + 3,5) \frac{V_t^{1,8}}{D^{1,22}} \quad (8)$$

Onde:

ΔP = perda de carga por atrito (kg/cm²);

L_t = comprimento total da tubulação (m);

X = concentração em peso de sólido transportado (kg de sólido/ kg de ar);

V_t = velocidade de transporte (m/s);

D = diâmetro dos dutos (mm).

Porém para calcular a perda de carga por atrito, se faz necessário a obtenção do comprimento total do transportador através da Equação 9, da concentração em peso de sólido transportado (Equação 10) e da vazão de ar (Equação 11).

$$L_t = L_h + 2L_v + L_e \quad (9)$$

Onde:

L_t = comprimento total (m);

L_h = comprimento total dos trechos horizontais (m);

L_v = comprimento total dos trechos verticais (m);

L_e = comprimento equivalente das curvas, válvulas e demais conexões (m).

$$X = \frac{C}{4,29 \times Q_g} \quad (10)$$

Onde:

X = concentração em peso de sólido transportado (kg de sólido/ kg de ar);

C = capacidade do transportador (t/h);

Q_g = vazão de ar (m^3/s).

$$Q_g = \frac{V_t \times D t^2}{1,27 \times 10^6} \quad (11)$$

Onde:

Q_g = vazão de ar (m^3/s);

V_t = velocidade de transporte (m/s);

$D t$ = diâmetro do duto (mm).

Para determinar o comprimento equivalente das curvas, utiliza-se sua relação com o diâmetro das tubulações, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Relação do diâmetro da tubulação com o comprimento equivalente

D (mm)	Le = Comprimento equivalente (m)
50	1,4
100	2,6
125	3,6
150	4,4
175	5,4
200	6,2
250	8,6
300	10,4
400	14

Fonte: Adaptado de Gomide (1983, p. 171).

Na perda de carga total do sistema (Equação 12), existe o fator de redução da perda de carga por aceleração (φ_p). Esse valor pode variar de acordo com o tipo de transporte, ou seja, $\varphi_p = 1,0$ se o sólido for alimentado depois do ventilador, 0,5 se o ponto de alimentação estiver localizado a montante da boca de aspiração (ou seja, passa pelo ventilador) (GOMIDE, 1983).

$$\Delta P_t = \left[1,68 \times L_t(X + 3,5) \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \times \varphi_p \times X \times V^2 + \Delta P_e \right] \times 10^{-4} \quad (12)$$

Onde:

ΔP_t = perda de carga total (kg/cm^2);

L_t = comprimento total (m);

X = concentração em peso de sólido transportado (kg de sólido/ kg de ar);

V_t = velocidade de transporte (m/s);

D = diâmetro dos dutos (mm);

φ_p = fator de redução da perda de carga por aceleração;

ΔP_e = perda de carga nos equipamentos (mm Ca).

Para determinar a perda de carga nos equipamentos, leva-se em conta o equipamento coletor, conforme mostra a Tabela 3, que demonstra a relação de alguns equipamentos com suas perdas de carga.

Tabela 3 – Relação de equipamentos com os valores de perda de carga

Equipamento de Coleta	Perda de Carga (mm CA)
Câmara gravitacional	20 a 40
Ciclone Comum	30 a 60
Ciclone de alta eficiência	70 a 150
Câmara de impactação	40 a 100
Filtros de tecido	80 a 150

Fonte: Adaptado de Gomide (1983, p. 171).

Ao calcular todas as perdas de cargas no transportador pneumático, realiza-se então o cálculo da potência necessária para o compressor (Equação 13). Porém se o sistema for de configuração direta, cujo material transportado passar pelo ventilador, diminuindo seu rendimento, é então acrescentado 25% na potência calculada.

$$P_v = 131,51 \times Q_g \times \Delta P_t \quad (13)$$

Onde:

P_v = potência do ventilador ou soprador (HP);

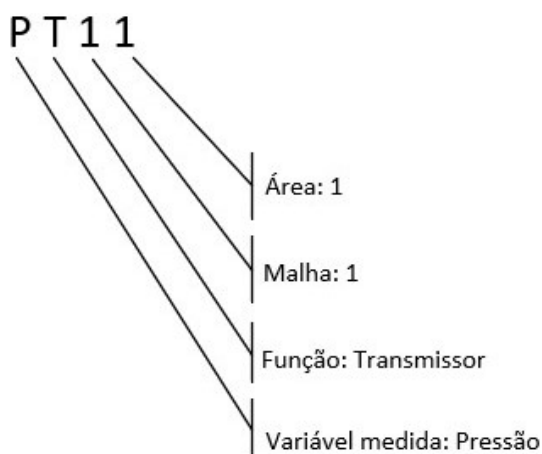
Q_g = vazão de ar (m³/s);

ΔP_t = perda de carga total (kg/cm²).

3.4 Desenvolvimento de um Diagrama *P&ID*

Com o auxílio do *software Microsoft Visio Professional 2019* foi desenvolvido o *Piping and Instrumentation Diagram/Drawing (P&ID)*, que é um diagrama geralmente utilizado em processos industriais no qual apresentam-se todas as tubulações, equipamentos, instrumentos e válvulas envolvidas no sistema, identificando cada componente com um *Tag*, ou seja, uma codificação alfanumérica para identificação dos instrumentos, válvulas e equipamentos existentes na planta industrial, conforme mostrado no esquema da Figura 11. É a partir deste diagrama que é possível identificar o sentido do fluxo, tipos de sinais de transmissão e a localização de cada equipamento/instrumento dentro do processo, assim como o controle de entradas e saídas dos equipamentos (ABNT, 1983). Além do *P&ID* do projeto, foi descrita a lógica do sistema de controle do transportador pneumático, descrevendo o funcionamento e a sequência de etapas para a operacionalidade do sistema.

Figura 11 – Esquema de identificação de instrumentos e equipamentos *P&ID*



Fonte: Do Autor (2020).

3.5 Levantamento de Custos do Sistema

Para realizar o levantamento de custos do projeto, foram contatados diversos fornecedores a fim de obter orçamentos de equipamentos, tubulações, instrumentos, válvulas e demais materiais necessários para a instalação do novo sistema.

Entretanto, a avaliação não levou em consideração os custos do serviço de instalação/mão de obra de terceiros para a realização do trabalho.

3.6 Avaliação do Rendimento da Produção Após Implantação de Novo Sistema de Transporte Pneumático

Como forma de mensurar o rendimento da produção com a instalação do novo sistema transporte pneumático em relação ao envase que existe atualmente, foram coletados dados de produção atual da empresa num período de 10 meses consecutivos (entre janeiro e outubro de 2020). Em seguida foram verificadas informações da empacotadora já adquirida pela empresa quanto sua capacidade de envase. Após o levantamento de todos os dados necessários, foram utilizadas planilhas da *Microsoft (Excel)* para realizar a análise e correlação de todas as informações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar o dimensionamento do projeto, foi primeiramente realizado a coleta de alguns dados necessários para a execução dos cálculos, como capacidade de produção requerida, diâmetro médio da partícula de *Whey Protein* e densidade aparente do pó.

A capacidade do sistema foi definida juntamente com a empresa, pensando em uma produtividade superior a atual, caso haja alguma futura ampliação. Assim, a capacidade foi definida para aproximadamente 2 t/dia ou 0,0833 t/h. Em relação à análise para determinação da massa específica do material, baseou-se em resultados obtidos de laudos internos da própria empresa, no qual utilizou-se um valor de 0,404 t/m³.

Para definir as características granulométricas, pesou-se 100 g de amostra de *Whey Protein* utilizando uma balança semi-analítica e com o auxílio de peneiras da série Mesh Tyler foram coletados os dados necessários para determinar o diâmetro médio das partículas. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4 – Resultados obtidos na análise granulométrica do Whey Protein

Peneiras		Composição granulométrica		
n°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Fração retida	Diâmetro médio (mm)
42	0,351	0	0	0
65	0,208	22,87	0,2302	0,2795
80	0,177	10,14	0,1021	0,1925
100	0,149	8,04	0,0810	0,1631
150	0,104	27,04	0,2722	0,1265
170	0,088	11,85	0,1193	0,0961
250	0,063	16,93	0,1704	0,0755
Panela		2,46		

Fonte: Do Autor (2020).

Para determinar a fração retida em cada peneira utilizou-se da Equação 1, o qual considerou-se a soma de todas as massas retidas mais o valor retido na peneira, totalizando 99,332 g como massa total da amostra. Observa-se que o valor encontrado na soma das massas retidas não atingi exatamente as 100 g da amostra inicial, que pode ser justificado como possível perda no processo.

Com os resultados da análise granulométrica foi possível calcular o Diâmetro de Sauter conforme Equação 5, cujo valores utilizados no cálculo foram os da peneira com maior massa retida, obtendo-se um valor de 0,000465 mm para as partículas do *Whey Protein*, que segundo Cremasco (2018) o caracteriza como um pó ultrafino.

$$D_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta \phi_i}{D_i}} \quad (5)$$

$$D_p = \frac{1}{\frac{0,2722}{0,1265}} = 0,000465 \text{ mm}$$

Após a coleta dos dados iniciais e avaliação do tamanho médio das partículas, realizou-se os cálculos de dimensionamento para determinar todas as variáveis pertinentes do sistema de transporte pneumático, utilizando-se das Equações 6 até 13.

$$Vt = 4,11 \sqrt[3]{\rho_{pa} \sqrt{D_p}} + 23,4 \sqrt{\rho_{pa}} \quad (6)$$

$$Vt = 4,11 \sqrt[3]{0,404 \sqrt{0,00047}} + 23,4 \sqrt{0,404} = 14,93 \text{ m/s}$$

Com o resultado da velocidade de transporte, foi possível calcular o diâmetro da tubulação onde considerou-se a capacidade de 0,0833 t/h.

$$Dt = 3016 \frac{\sqrt{C}}{V_t^{0,98}} \quad (7)$$

$$Dt = 3016 \frac{\sqrt{0,0833}}{14,93^{0,98}} = 61,50 \text{ mm}$$

Após calcular o diâmetro da tubulação, determinou-se o comprimento da tubulação, para isto foi necessário definir o comprimento equivalente das curvas (L_e), no qual utilizou-se a relação com o diâmetro das tubulações 2,6 m, conforme Tabela 2.

$$L_t = L_h + 2L_v + L_e \quad (9)$$

$$L_t = 2 + 2 * 2 + 2,6 = 8,60 \text{ m}$$

Em seguida foi calculado a vazão de ar (Q_g) através da Equação 11.

$$Q_g = \frac{V_t \times Dt^2}{1,27 \times 10^6} \quad (11)$$

$$Q_g = \frac{14,96 \times 61,50^2}{1,27 \times 10^6} = 0,0445 \text{ m}^3/\text{s}$$

Com o resultado da Equação 11, calculou-se a concentração em peso de sólido transportado (X) conforme Equação 10.

$$X = \frac{C}{4,29 \times Q_g} \quad (10)$$

$$X = \frac{0,0833}{4,29 \times 0,0445} = 0,43635$$

Uma vez que estas variáveis iniciais foram calculadas, é possível determinar a perda de carga total do sistema (ΔP_t).

$$\Delta P_t = \left[1,68 \times L_t (X + 3,5) \frac{V_t^{1,8}}{Dt^{1,22}} + 0,138 \times \varphi_p \times X \times V^2 + \Delta P_e \right] \times 10^{-4} \quad (12)$$

$$\Delta P_t = \left[1,68 \times 8,60 (0,4363 + 3,5) \frac{14,93^{1,8}}{61,50^{1,22}} + 0,138 \times 1 \times 0,4363 \times 14,93^2 + 80 \right] \times 10^{-4}$$

$$\Delta P_t = 0,014199 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{ ou } 141,98 \text{ mm CA}$$

Em relação ao cálculo da perda de carga nos dutos do sistema de transporte, foram realizadas algumas considerações, no qual levou-se em consideração o fator de redução da perda de carga por aceleração (φ_p) como sendo igual a 1, pois o sólido a ser transportado será alimentado depois do ventilador/compressor. Já para a perda de carga nos equipamentos (ΔP_e) considerou-se o valor de 80 mm CA, visto que o equipamento coletor no final da linha de transporte possui características similares a uma câmara de impactação (GOMIDE, 1983).

E por fim calculou-se a potência do ventilador/compressor necessário para o projeto, conforme Equação 13.

$$P_v = 131,51 \times Q_g \times \Delta P_t \quad (13)$$

$$P_v = 131,51 \times 0,0445 \times 0,014199 = 0,08 \text{ HP}$$

Após todos os cálculos necessários para o dimensionamento, os resultados encontrados foram dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos cálculos executados para o dimensionamento

Vt (m/s)	Lt (m)	Dt (mm)	Qg (m³/s)	X	ΔP_t (mm CA)	Pv (HP)
14,93	8,60	61,50	0,0445	0,4363	141,98	0,08

Onde: Velocidade de transporte (Vt), diâmetro do duto (Dt), comprimento total (Lt), vazão de ar (Qg), concentração em peso de sólido transportado (X), perda de carga no duto (ΔP_t) e potência do compressor (Pv).

Fonte: Do Autor (2020).

4.1 Características do Sistema

De acordo com Mills (2015), uma das características de um transportador pneumático que trabalha em fase diluída é apresentar velocidade entre 12 m/s para um pó fino a 16 m/s para um material granular fino, assim verifica-se que o fluxo de ar para o projeto apresenta característica de fase diluída, visto que a velocidade de transporte obtida nos cálculos de dimensionamento foi em torno de 14,93 m/s.

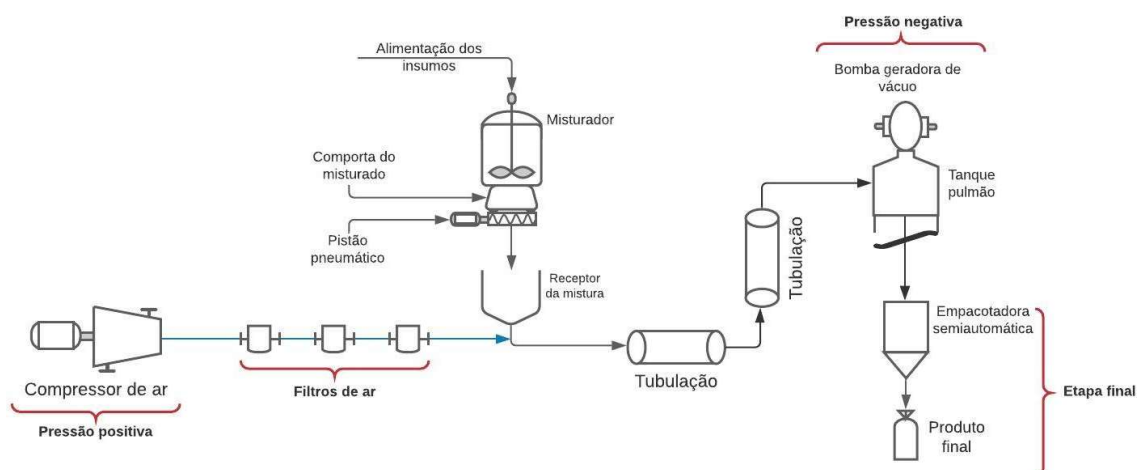
Para este sistema escolheu-se também o tipo indireto, pois com isso será evitado que o material transportado danifique o compressor de ar no início da linha, que poderia provocar quebra e desgaste do seu rotor e paredes internas (SILVA, 2005). Quanto as pressões que serão exercidas na tubulação, serão utilizadas pressões positiva e negativa (combinadas), portanto será instalado um gerador de ar (compressor) no início da linha de transporte e uma bomba de vácuo no final da linha para auxiliar no deslocamento do pó.

Como atualmente o misturador encontra-se instalado próximo ao sistema de envasamento no processo, não será preciso uma grande quantidade de tubulações para montagem dos dutos de transporte de ar do sistema pneumático até a empacotadora semiautomática, sendo necessários cerca de 4 metros de comprimento de dutos com diâmetro de 61,50 mm para satisfazer a capacidade de envase.

4.2 Detalhamento do Processo

Para o detalhamento do processo foi desenvolvido um fluxograma do layout do sistema de transporte para facilitar o entendimento e a compreensão, o qual pode ser observado na Figura 12. Tendo conhecimento das características do processo, realizou-se um levantamento de todos os equipamentos necessários ao projeto, buscando possíveis fornecedores para futura implantação.

Figura 12 – Fluxograma geral do sistema de transporte pneumático



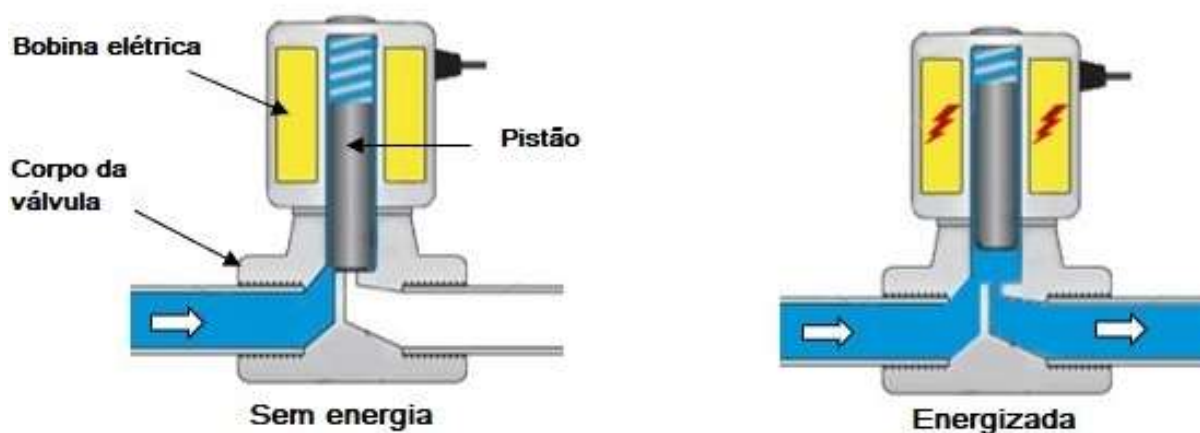
Fonte: Do Autor (2020).

A empresa atualmente já conta com dois equipamentos envolvidos no processo, que são o misturador dos insumos, o qual já está sendo utilizado pela empresa, e a empacotadora semiautomática do final da linha da produção, que no presente momento não está em funcionamento justamente por não possuir nenhum sistema de transporte adequado para alimentação do sistema. Os demais equipamentos ainda serão adquiridos pela empresa assim que o projeto for colocado em prática.

O processo tem início na alimentação dos insumos ao misturador, onde após 20 minutos a mistura está concluída. O operador então aciona manualmente a válvula solenoide que por sua vez dispara ar para o pistão pneumático, que tem como função comandar a abertura e o fechamento da comporta que estará acoplada na parte inferior do misturador, com a comporta aberta a mistura é despejada no tanque receptor localizado abaixo do misturador. Neste momento o compressor entra em operação, succionando ar do ambiente e comprimindo até o tanque receptor.

O ar antes de chegar ao tanque receptor da mistura passa por uma válvula solenoide 2/2 de ação direta, que quando não energizada mantém-se na posição fechada bloqueando a passagem do fluido e quando recebe sinal elétrico, desloca o pistão para cima, liberando assim a passagem do ar (MASTER TECNOLOGIA INDUSTRIAL, 2020). A Figura 13 ilustra o funcionamento desta válvula.

Figura 13 – Imagem ilustrativa do funcionamento da válvula solenoides 2/2

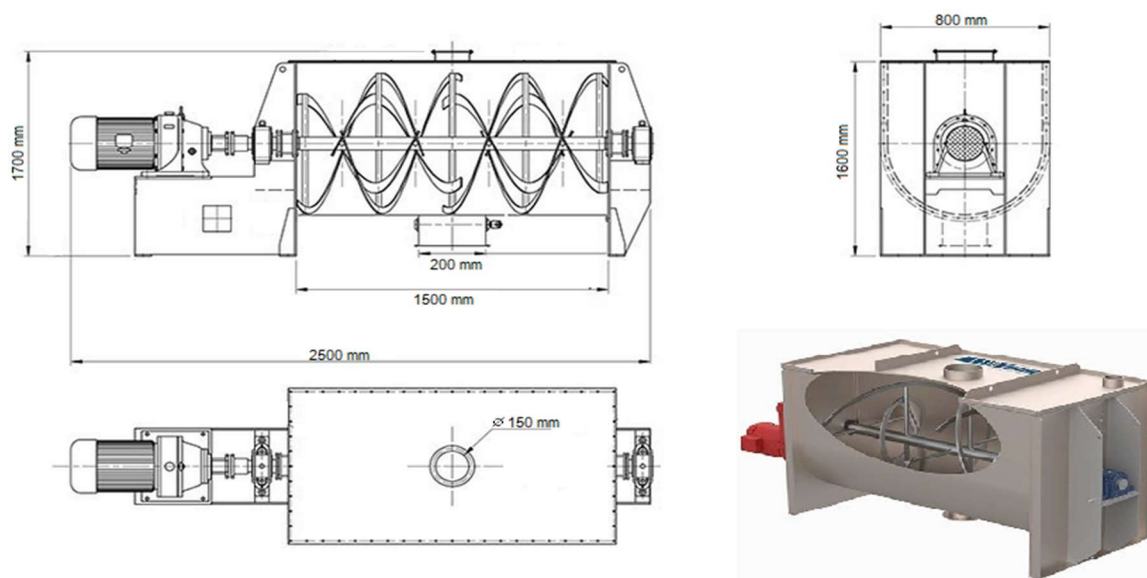


Fonte: Adaptado de Master Tecnologia Industrial (2020)

Após passar pela válvula 2/2, passará também por três filtros consecutivos para garantir a eliminação de possíveis gotas de óleo, água e sujidades do sistema, e em seguida segue pela tubulação carregando o pó diluído pela linha. Uma bomba geradora de vácuo acoplada no tanque pulmão estará instalada antes da empacotadora, com a função de auxiliar no transporte do material gerando uma pressão negativa no sistema. O material após passar pelo tanque pulmão, é armazenada num recipiente superior pertencente à empacotadora. Por fim, se inicia o envase do material misturado para dentro das embalagens do produto final.

Em relação ao misturador dos insumos, o equipamento existente na empresa é do tipo *Ribbon Blender*, fabricado pela empresa Metalis, com capacidade para 250 kg por batelada. O misturador conta com hélices helicoidais internas que impulsionam o produto garantido assim uma mistura eficiente. Possui motor do fabricante Weg com potência de 3 HP. Toda a estrutura é fabricada em aço inox 304, devido à sua resistência e robustez, sendo este um material muito utilizado pelas indústrias de alimentos, por ser um material polido, liso e sem a presença de poros, o que impede o acúmulo de alimentos na estrutura e diminui muito as chances de crescimento microbiano (CALLISTER; RETHWISCH, 2015; CAETANO, 2016). Este tipo de misturador possui ainda tempo de mistura entre 3 a 20 minutos, agilizando o processo (AGIMIX, 2020). A Figura 14 demonstra a imagem ilustrativa do misturador assim como suas devidas dimensões.

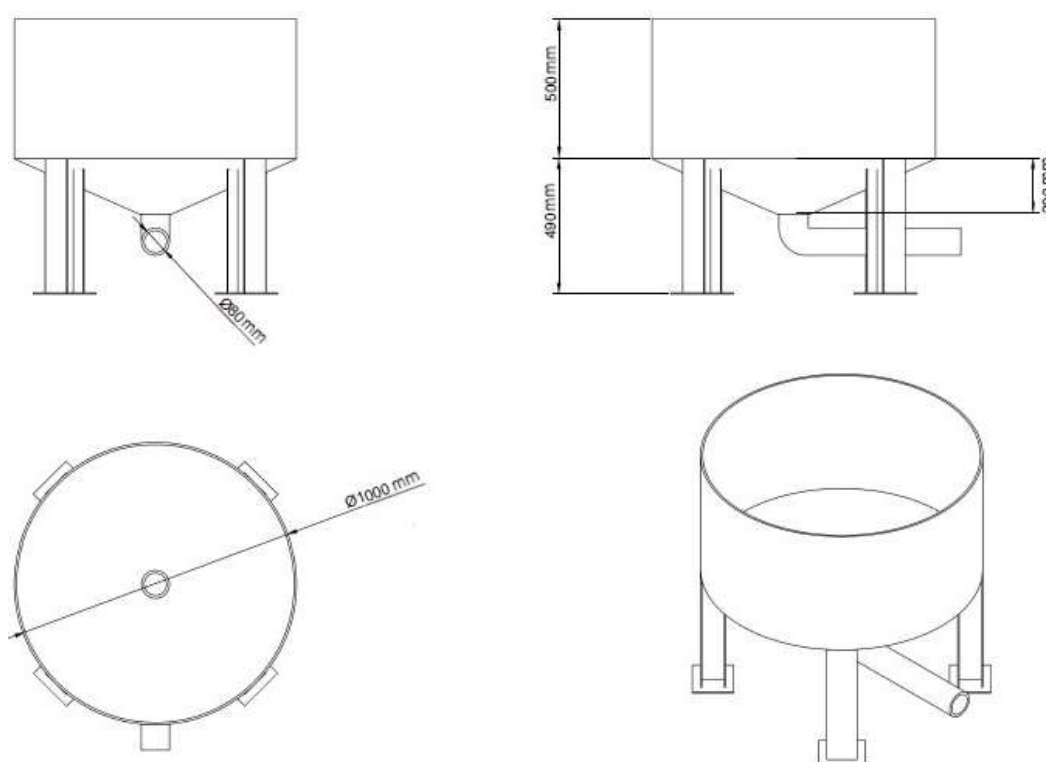
Figura 14 – Imagens ilustrativas com as dimensões do misturador *Ribbon Blender*



Fonte: Adaptado de Metalis (2017)

Logo abaixo do misturador será instalado um tanque com formato cilíndrico para a recepção do pó, no qual armazenará a mesma capacidade de produto que foi misturado. Para o correto funcionamento do novo sistema, o equipamento tem por finalidade facilitar a transferência do material para a tubulação do sistema pneumático. A tubulação abaixo do tanque receptor da mistura fará a transferência do produto até a empacotadora, utilizando o ar vindo do compressor como fluido de arraste. Para a escolha deste tanque receptor, realizou-se orçamento com a empresa Metalis para fabricação do tanque em aço inox 304. A Figura 15 mostra imagens em 2D do tanque receptor da mistura definido para o projeto.

Figura 15 – Imagem em 2D do tanque receptor de produto após a mistura



Fonte: Metalis (2020)

Em relação ao compressor a ser usado no sistema e com base na potência necessária calculada para o transportador, que foi de 0,08 HP, verifica-se que um compressor de até 1 HP seria suficiente, porém considerando os planos futuros de ampliação da empresa e aumento da demanda produtiva, sugere-se que seja adquirido um compressor de 3 HP e da marca *Schulz* modelo CSL 15BR/100, pois oferece alta performance e desempenho eficientes para trabalhos industriais, possuindo vazão máxima de 42 L/min, pressão de operação de no mínimo 6,9 bar e

no máximo 9,7 bar, com largura, altura e profundidade de 48 x 80 x 90 cm e reservatório de 100 litros (SCHULZ, 2018). A Figura 16 demonstra o compressor proposto para o sistema de transporte pneumático proposto.

Figura 16 – Imagem do compressor Schulz, modelo CSL 15BR/100 a ser usado para o projeto

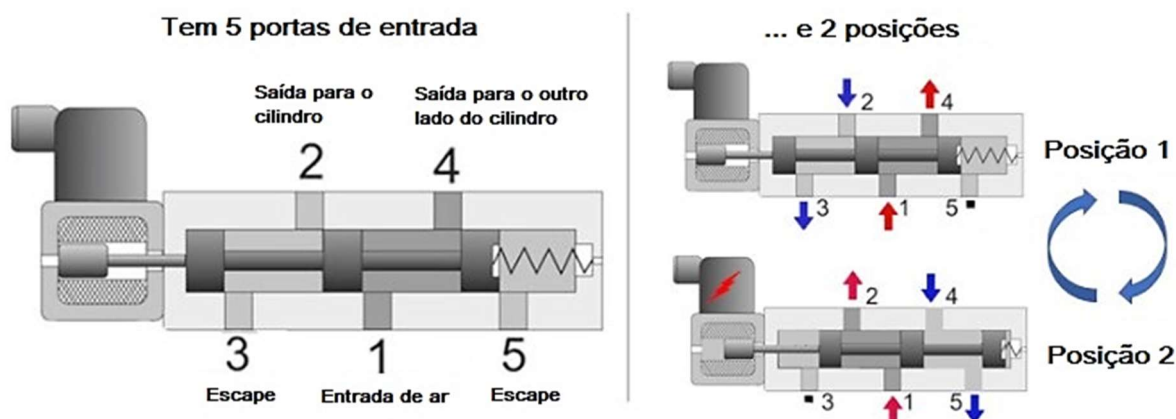


Fonte: Schulz (2018).

Para os filtros de ar, indicam-se filtros específicos para ar comprimido, que trabalhem com pressão máxima de 10 bar, operando dentro da faixa operacional do compressor de ar do sistema. Estes filtros possuem grau de filtragem de 25 μm , para retenção de particulados, gotículas de óleo e sujidades, atendendo vazões de operação de até 750 L/min (KFF, 2020).

Já o pistão pneumático a ser instalado abaixo do misturador deve ser alimentado com ar comprimido, convertendo essa ação em força para auxiliar na abertura da comporta do misturador *Ribbon Blender*. Uma válvula solenoide 5/2 acionará este pistão, que irá comandar a abertura e fechamento do sistema de descarga do misturador. Este tipo de válvula é conhecido também por válvula direcional, sendo que estes modelos são amplamente utilizados em sistemas pneumáticos. Já o pistão trabalha com pressão máxima de 10 bar, e sua escolha para abertura da comporta ao invés de uma válvula rotativa para a descarga do pó justifica-se por ser relativamente mais simples e barato, sendo essa uma opção que se enquadra dentro do orçamento da empresa. A Figura 17 ilustra o esquema das válvulas solenoides 5/2 a serem utilizadas.

Figura 17 – Imagem ilustrativa da válvula solenoides 5/2

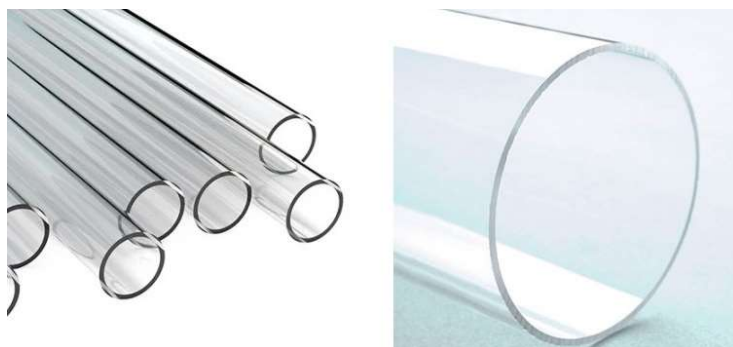


Fonte: Adaptado de Master Tecnologia Industrial (2020).

Este modelo possui 5 portas e 2 posições de atuação, na qual a porta 1 é a entrada de ar, a porta 2 é a saída para um lado do cilindro pneumático, a porta 4 é a saída para o outro lado do cilindro e as portas 3 e 5 são os escapes de ar de cada lado do cilindro. Tanto a válvula solenoide 2/2 como a 5/2 são fabricadas pela empresa Master Tecnologia Industrial (MASTER TECNOLOGIA INDUSTRIAL, 2020).

Conforme Dicknow (2013), se o material a ser transportado não for abrasivo, uma tubulação de paredes finas e lisa será extremamente eficiente. Desta maneira, em relação às tubulações a serem utilizadas no sistema de transporte, propõem-se que sejam de material acrílico. Pelo fato de ser um tipo de tubulação transparente, além de facilitar a visualização do pó transportado, auxilia no controle de qualidade e também na praticidade em relação à limpeza/higienização. Também apresenta algumas outras vantagens em relação ao aço inox, sendo um material mais leve e de fácil montagem. As tubulações de acrílico mais utilizadas em indústrias de alimentos são produzidas utilizando o metacrilato de metila (MMA) como matéria-prima, garantindo tubulações com alta resistência à ruptura, ótimo brilho, totalmente lisas e transparentes. Conforme contato com fornecedor deste tipo de tubulações, estes tubos são fabricados de acordo com a norma de qualidade ISO 9001-2000 e aprovados pela *Food and Drug Administration* (FDA), o que garante que estão aptos para o transporte seguro de alimentos (CENTRAL DO ACRÍLICO, 2020). A Figura 18 apresenta uma imagem ilustrativa dos tubos de acrílico a serem utilizados no projeto.

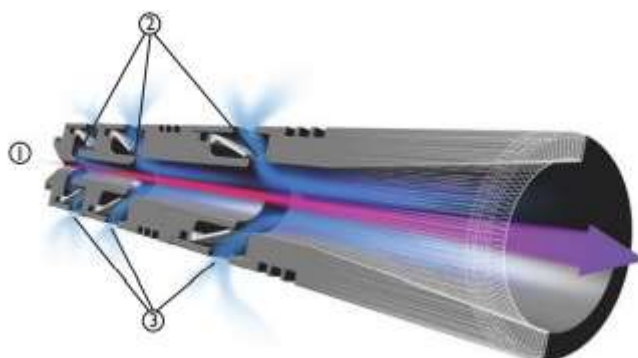
Figura 18 – Imagem ilustrativa dos tubos de acrílico para o sistema de transporte



Fonte: Central do Acrílico (2020).

Para o sistema de vácuo no tanque pulmão instalado antes da empacotadora do produto, pretende-se utilizar uma bomba de vácuo baseada na tecnologia COAX®, que é uma solução avançada para criar vácuo em sistemas com ar comprimido. Um sistema de vácuo baseado nesta tecnologia consegue gerar um fluxo três vezes maior do que os sistemas convencionais, resultando em maiores velocidades e redução de consumo energético em até 50%, garantindo um desempenho mesmo em pressões baixas ou altas de alimentação. Neste sistema o ar comprimido entra pelo ejetor (ponto 1), passa por suas entradas laterais (pontos 2 e 3) e gera um efeito de sucção em cada entrada lateral, resultando assim num potente e eficiente equipamento gerador de vácuo. A Figura 19 mostra o funcionamento desta tecnologia (PIAB, 2020).

Figura 19 – Esquema ilustrativo mostrando a bomba de vácuo com a tecnologia COAX®

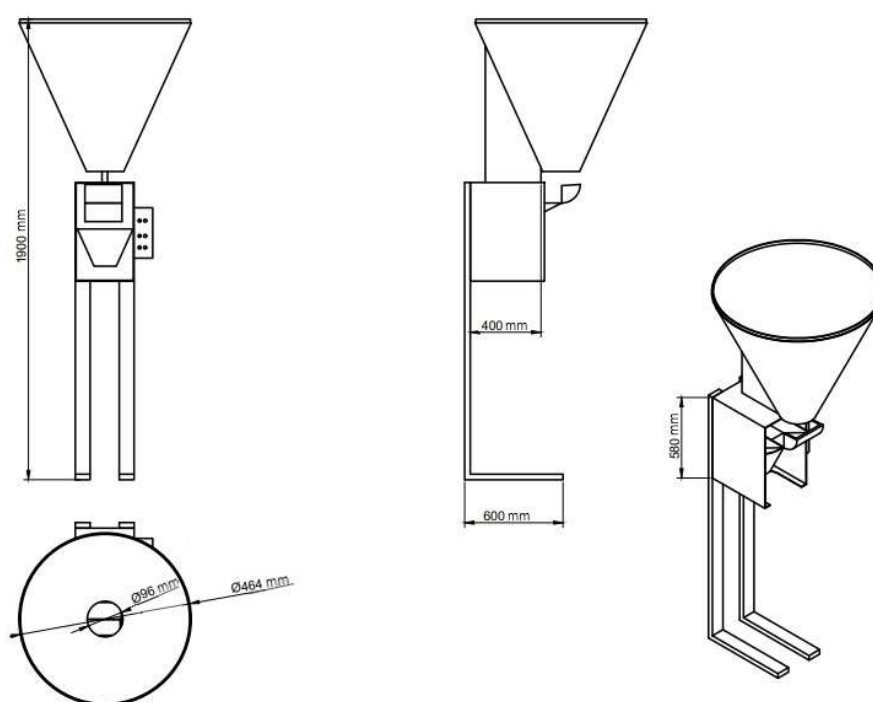


Fonte: PIAB (2020).

Por fim, a empresa já possui atualmente uma empacotadora, não sendo assim necessário sua aquisição para o projeto. Este equipamento será apenas

inserido e adaptado ao projeto do sistema de transporte pneumático. A empacotadora usada é fabricada em aço inox 304 e possui um controlador acoplado em sua lateral que realiza todo o controle da lógica de funcionamento do sistema. Este equipamento tem capacidade de envase de 3 unidades por minuto e permite configurar a massa desejada para a embalagem de acordo com seu tamanho. Conta também com uma balança analítica que realiza uma auto-calibração a cada 3 embalagem envasadas, com o intuito de garantir sempre a maior precisão possível. O equipamento foi fabricado pela empresa BRS Engenharia. A Figura 20 apresenta detalhe da empacotadora com suas principais dimensões.

Figura 20 – Imagem ilustrativa e dimensões da empacotadora semiautomática



Fonte: Do Autor (2020).

4.3 Lógica do Sistema de Controle

Para a compreensão da lógica envolvida no projeto do transportador pneumático desenvolveu-se um diagrama de tubulações e instrumentos do sistema (P&ID). A Figura 21 mostra o esquema do diagrama elaborado.

Como o diagrama é composto por diversos equipamentos, válvulas e instrumentos, além dos sinais de transmissão, estes são identificados com Tags para descrição e detalhamento do sistema. O Quadro 2 mostra as descrições de todos os instrumentos presentes no processo.

Quadro 2 – Tags de identificação dos instrumentos e alarmes envolvidos no projeto

TAG	Descrição
FC	Controlador de vazão
FT	Transmissor de vazão
FV	Válvula de vazão
PIC	Controlador indicador de pressão
PT	Transmissor de pressão
LT	Transmissor de nível
LC	Controlador de nível
CLP	Controlador da lógica de programação
FY	Conversor de sinal
PAH	Alarme de pressão alta
LAHH	Alarme de nível muito alto
LALL	Alarme de nível muito baixo
IS	Intertravamento de segurança

Fonte: Do Autor (2020).

O Quadro 3 apresenta a identificação de todos os equipamentos e siglas envolvidos no projeto.

Quadro 3 – Lista de equipamentos e siglas envolvidas no projeto

Equipamentos/siglas	Descrição
CP1	Compressor de ar
RB2	Misturador <i>Ribbon Blender</i>
PP2	Pistão pneumático
FT1	Filtro de ar comprimido 1
FT2	Filtro de ar comprimido 2
FT3	Filtro de ar comprimido 3
RM3	Tanque receptor da mistura do RB2
BV4	Bomba a vácuo
TP4	Tanque pulmão
RM5	Tanque receptor da mistura da EP5
EP5	Empacotadora
PF	Produto final

Fonte: Do Autor (2020).

O desenvolvimento do diagrama P&ID foi dividido em 5 áreas e cada área possui seus devidos equipamentos, dispositivos e sistemas de controle. Por tratar-se de um sistema pneumático projetado para uma empresa de pequeno porte, o sistema foi baseado na utilização de somente uma malha principal, não havendo necessidade de outras malhas de segurança.

Na área 1 encontram-se os seguintes equipamentos e instrumentos: CP1, FV11, FT1, FT2 e FT3. Na área 2 estão o RB2, FV 12 e o PP2, enquanto que a área 3 possui somente o RM3 e a FV13. Já a área 4 tem-se a BV4, TP4 e a FV 14. A área 5 apresenta o RM5 e EP5.

O processo inicia-se na área 2 com a alimentação dos insumos no RB2, que descarrega a mistura pelo fundo por uma comporta que é acionada simultaneamente pela válvula FV 12 e pelo pistão pneumático que são interligados e tem como função, abrir e fechá-la. A mistura então passa do RB2 para o RM3 ficando em repouso até que o sistema (CLP) seja ligado. Tanto a partida do RB2 como o acionamento do FV 12 serão manuais.

Para iniciar a transferência do produto até o envase, parte-se o compressor CP1, este compressor possui sistema de transmissão e controle de pressão com os instrumentos PT 11 e PIC 11, além de um alarme de pressão alta (PAH 11) ligado a um intertravamento (IS 11). Em caso de a pressão ultrapassar o valor de operação, o IS 11 desliga o compressor até a normalização da pressão.

Após a partida do compressor o operador então aciona a partida da EP5 na botoeira localizada no próprio equipamento. Neste momento é verificado o nível do RM5, medido pelos instrumentos LT 15 e o LC 15, devendo este nível estar abaixo de 60%, assim o CLP 15 acionar as válvulas FV 11 e FV 14 para abrir e ligar a BV4, colocando o sistema em operação.

A função da BV4 é de gerar pressão negativa junto ao tanque pulmão TP4, auxiliando assim o CP1 a transportar o material do RM3 pela tubulação até o RM5. O RM5 contará com controlador de nível (LC 15) e irá funcionar com *timer* programado de 5 segundos, fazendo a verificação do nível dentro deste intervalo de tempo. Se o nível estiver abaixo de 60% o sistema permanece ligado e funcionando, entretanto, se o nível ultrapassar este valor o sistema irá desligar, cortando os sinais para as válvulas FV 11 e FV 14 e para a bomba BV4.

Caso o RM5 encha até um nível de 90% atuará um alarme de nível muito alto (LAHH), fechando as válvulas FV 11 e FV 14 e parando a bomba a vácuo BV4. Já

com o intuito de evitar que o sistema opere sem pó na linha de transporte (momento que o RM3 esvaziar por completo) é realizada também o controle do nível em 20%, atuando assim o alarme de nível muito baixo (LALL), o qual desligará o sistema.

De uma forma geral o RB2 e o RM3 são independentes, ou seja, no momento que o misturador estiver vazio, poderá ser alimentado novamente com mais insumos para a próxima batelada de mistura, visto que no momento que o RM3 estiver vazio já terá outra carga preparada a ser transferida para o seu interior. Isto mantém o processo operando de forma contínua, sem necessidade de paradas do envase do produto final.

4.4 Levantamento de Custos Com Materiais, Equipamentos e Instrumentos

A estimativa de custos para este projeto foi baseada somente na aquisição de equipamentos, tubulações, peças e instrumentos. Não foram considerados os serviços para instalação e também não foram contabilizados os equipamentos que a empresa já possuía. O Quadro 4 apresenta a relação e os custos dos equipamentos a serem adquiridos para o projeto

Quadro 4 – Custos dos equipamentos do novo sistema de transporte pneumático

Equipamento	Custo	Quantidade
Compressor	R\$ 2439,60/unidade	1 unidade
Válvulas solenoide 2/2	R\$ 354,14/unidade	1 unidades
Válvulas solenoide 5/2	R\$ 85,05/unidade	2 unidades
Controlador indicador de pressão	R\$ 51,79/unidade	1 unidades
Filtros de ar	R\$ 45,54/unidade	3 unidades
Pistão pneumático	R\$ 249,90/unidade	1 unidade
Bomba de vácuo	R\$ 5835,89/unidade	1 unidade
Tubulação em acrílico	R\$ 218,18/metro	4 metros
Curva 90° em acrílico	R\$ 25,83/unidade	2 unidades
Tanque receptor da mistura (RB3)	R\$ 3000,00/unidade	1 unidade

Fonte: Do Autor (2020).

Com os valores de orçamentos levantados com fornecedores de equipamentos, instrumentos e demais materiais chegou-se a uma estimativa de custos para implementação do projeto, obtendo-se um valor na faixa de R\$ 13162,72. Este valor é apenas uma estimativa, não levando-se em consideração os

custos envolvidos com instalação, montagem e mão-de-obra. Vale ressaltar que alguns instrumentos como transmissores, controladores e conversores de sinais elétricos para pneumáticos (I/P) também não foram listados nos custos, pois não foram fornecidos orçamentos pelos fabricantes.

4.5 Avaliação do Rendimento da Produção Após Implementação do Novo Sistema de Transporte Pneumático

A fim de avaliar os tempos de processo e a capacidade produtiva do sistema de envase atual da empresa e realizar uma simulação, comparando com o sistema de transporte pneumático a ser implantado, foram coletados dados de produção de *Whey Protein* de 10 meses no ano de 2020. Além de ganhos com ergonomia e tempo de envase, esta melhoria no processo da empresa de suplementos alimentares visa também aumentar a capacidade de produção. Assim, em testes preliminares já efetuados com a empacotadora, verificou-se uma capacidade de envase de 3 unidades por minuto, resultando em 180 unidades por hora, com massa aproximada de 900 gramas cada em embalagem.

Como o sistema atual da empresa é totalmente manual, a capacidade de produção é de aproximadamente 50 unidade por hora. Os dados coletados de produção atual dos últimos 10 meses consecutivos, entre janeiro e outubro de 2020, estão dispostos na Tabela 6.

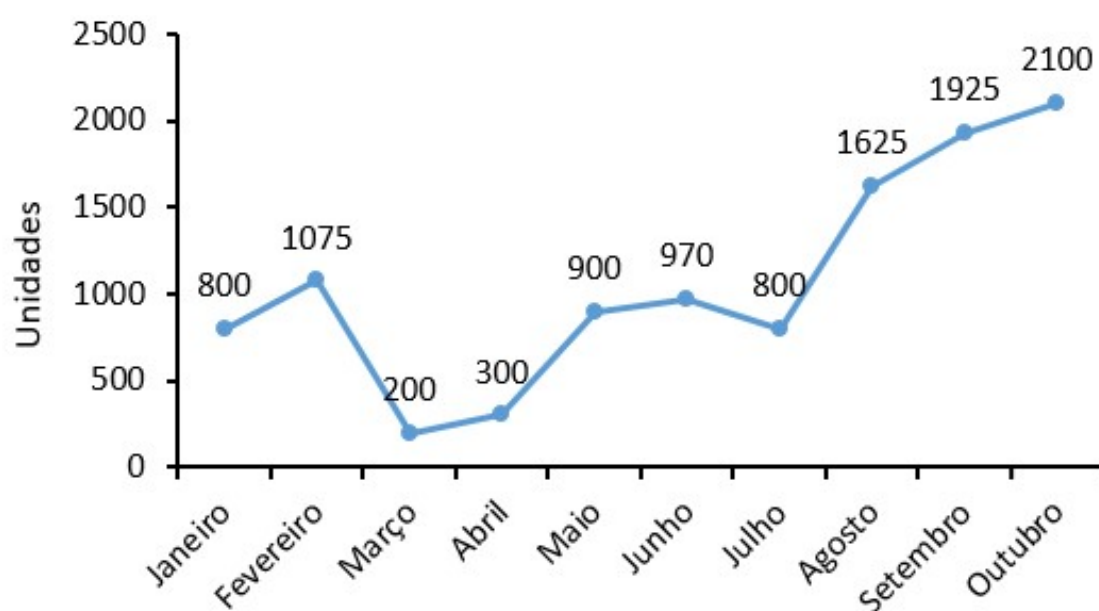
Tabela 6 – Controle de produção do *Whey Protein* no ano de 2020

Numeração	Mês	Unidades envasadas	Horas trabalhadas
1	Janeiro	800	16
2	Fevereiro	1075	21,5
3	Março	200	4
4	Abril	300	6
5	Maio	900	18
6	Junho	970	19,4
7	Julho	800	16
8	Agosto	1625	32,5
9	Setembro	1925	38,5
10	Outubro	2100	42

Fonte: Do Autor (2020).

Com os dados disponível na Tabela 6 pôde-se analisar as quantidades produzidas pela empresa, e levando-se em conta que a capacidade de produção atual a coluna “Horas trabalhadas” representa quantas horas aproximadamente foram consumidas para a produção de cada mês. Na Figura 22 é mostrado um gráfico de tendência mês a mês comparando a produção durante o ano de 2020.

Figura 22 – Dados de controle de produção mês a mês, analisados de janeiro a outubro de 2020



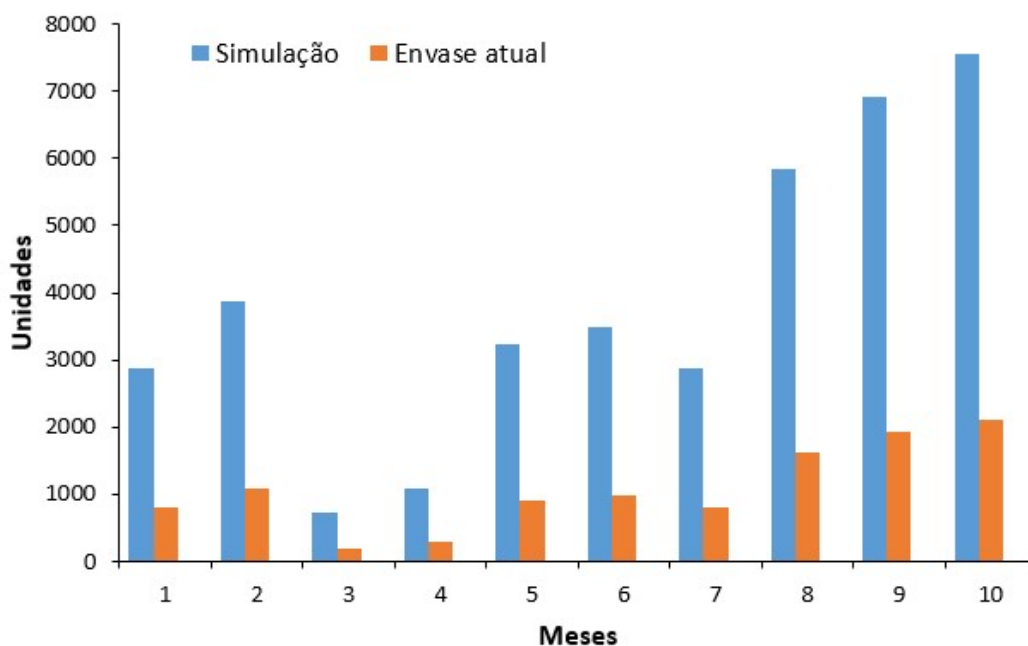
Fonte: Do Autor (2020).

Alguns fatores que podem ser percebidos ao analisar estes dados foi o impacto causado pelo vírus Covid19 na produção durante o ano, causando uma queda drástica de consumo deste suplemento nos meses de março e abril devido ao período inicial de isolamento social das pessoas. Entretanto, o cenário foi mudando nos meses que se sucederam, tendo uma tendência de normalização a partir de maio, onde a produção já havia voltado a patamares semelhantes aos obtidos antes da pandemia. Porém os dados demonstram que a partir do mês de agosto houve um aumento significativo na demanda deste suplemento, praticamente dobrando o número de unidades produzidas em relação a janeiro de 2020, seguindo em crescente aumento nos meses de setembro e outubro. Este aumento significativo de produção corrobora com o aumento de capacidade pretendido pela empresa e com a instalação do sistema de transporte pneumático, pois ressalta essa necessidade da empresa em automatizar esta etapa da produção, evitando assim a contratação

de novos funcionários para trabalhar no envase manual e suprir este aumento de demanda. Além disso, destaca-se a economia financeira referente à implementação do projeto, com uma capacidade superior e mais eficiente.

Para fins de comparação, realizou-se uma simulação supondo que neste mesmo período de 10 meses o sistema de transporte pneumático e a empacotadora já estivesse em operação. O resultado foi surpreendente, proporcionando um aumento de 260% na produtividade por hora da empresa para a fabricação deste determinado produto com o novo sistema. A Figura 23 demonstra o comparativo realizado.

Figura 23 – Simulação comparativa de rendimento da produção atual e da futura implementação do sistema de transporte pneumático



Fonte: Do Autor (2020).

Como pode-se perceber pelos dados simulados, analisando o mesmo período de 10 meses com a mesma carga horária verifica-se que a produtividade seria extremamente maior, com uma capacidade de produção praticamente três vezes superior. Observa-se que em todos os meses há um aumento de produção das unidades de *Whey Protein*, entretanto no mês 10 (outubro) os valores são mais significativos, uma vez que foi o mês com maior tempo investido na fabricação deste suplemento.

Outro aspecto relevante a ser considerado seria a falta de insumos suficientes para fabricar todas as unidades de acordo com a capacidade da empacotadora e mesma carga horária (aumento 3X maior na capacidade de produção e consequente aumento do consumo de matéria-prima). Neste caso, poderia ser analisada a possibilidade de fabricar as mesmas quantidades apresentadas na Tabela 6, entretanto utilizando tempos relativamente menores. Tal comparação pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação de unidades envasadas pela empacotadora com redução das horas trabalhadas

Numeração	Mês	Unidades envasadas	Horas trabalhadas
1	Janeiro	800	4,4
2	Fevereiro	1075	6
3	Março	200	1,1
4	Abril	300	1,7
5	Maio	900	5
6	Junho	970	5,4
7	Julho	800	4,4
8	Agosto	1625	9
9	Setembro	1925	10,7
10	Outubro	2100	11,7

Fonte: Do Autor (2020).

Com esta comparação pode-se perceber na coluna “Horas trabalhadas” que o tempo gasto para fabricar as mesmas quantidades de produtos seria muito inferior, resultando principalmente em economia de tempo, que por sua vez poderia ser utilizado na fabricação de outros produtos existentes dentro do vasto portfólio da empresa.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi realizado como proposição futura de implementação de um sistema de transporte pneumático totalmente novo para a empresa em questão, que no momento da execução deste projeto contava apenas com uma empacotadora semiautomática fora de operação, operando seu envase de suplementos de forma manual. Como futura melhoria a empresa pretende implantar assim um sistema pneumático de transporte dos insumos misturados até a empacotadora já adquirida, tornando o envase automatizado.

Entre os objetivos traçados para alcançar os resultados propostos, pode-se destacar a realização de todos os cálculos necessários para dimensionamento do sistema de transporte pneumático com base numa produtividade diária de 2 toneladas, no qual foi possível caracterizá-lo e definir assim seu modo de operação, relacionando com dados da literatura. Outro ponto importante a ser mencionado foi o desenvolvimento do diagrama *P&ID* do novo sistema, no qual foi possível visualizar de uma forma clara e sucinta todos os equipamentos, instrumentos, válvulas e alarmes envolvidos.

Além disso, a realização do levantamento de custos foi a etapa do projeto que proporcionou prever aproximadamente qual seria o investimento necessário para a empresa ao implementar este projeto. Ao analisar os custos envolvidos, obteve-se um valor estimado de aproximadamente R\$ R\$ 13162,72, sem considerar alguns custos de instrumentos, de mão-de-obra e instalação. Pode-se verificar que este investimento não é tão elevado comparado aos ganhos que a empresa pode obter com esta melhoria, uma vez que quando o novo sistema estiver em operação irá proporcionar maior capacidade produtiva, reduzindo assim tempos de fabricação,

eliminando trabalhos manuais e consequentemente evitando a contratação de novos funcionários.

Outra parte relevante deste projeto foi a coleta e análise dos dados da produção atual de *Whey Protein* no ano de 2020, no qual foi possível perceber que mesmo em meio a uma pandemia que atingiu o mundo inteiro, a empresa conseguiu retomar suas atividades com a demanda maior do que a alcançada antes deste período, no início deste ano, demonstrando assim a capacidade de recuperação do crescimento da empresa e o quão importante será essa implementação futura. Além disto este novo sistema resultaria em uma nova realidade para a empresa, uma vez que a capacidade produtiva aumentaria de forma bastante significativa, com crescimento de 260% em relação ao envase atual instalado.

Por fim, percebe-se que o tempo investido no desenvolvimento deste projeto proporcionou a possibilidade de aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Química, sendo extremamente gratificante chegar à etapa final e visualizar a importância do estudo de muitas disciplinas vistas ao longo do curso, como operações unitárias, instrumentação e controle de processos entre outras, demonstrando como um engenheiro químico pode mostrar seu papel e contribuir de diferentes formas dentro das empresas e o quão relevante se faz manter o interesse no aprendizado para o crescimento da carreira profissional.

REFERÊNCIAS

- AGIMIX. **Misturadores Ribbon Blender**. 2020. Disponível em: <https://www.agimix.com.br/portfolio-items/misturadores-ribbon-blender/>. Acesso em: 20 set. 2020.
- ALMEIDA, C. C. **Avaliação de suplementos nutricionais à base de Whey Protein**. 2014, 83 f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8190**: Simbologia e instrumentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- BACURAU, R. F. **Nutrição e suplementação esportiva**. 6. ed. São Paulo: PHORTE, 2009.
- BERTOLINO, M. T. **Gerenciamento da qualidade na indústria alimentícia: Ênfase na segurança de alimentos**, 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.
- BHATIA, A. **Pneumatic Conveying Systems**. 5. ed. Stony Point: 9 Greyridge Farm Court, 2010.
- BORTOLAIA, L. A.; ANDRIGHETTO, P. L.; BENATTI, M. **Avaliação técnica de um transportador pneumático de grãos por aspiração**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 526-529, 2008.
- CAETANO, G. Q. **Soldagem similar de aços inoxidáveis ferríticos e í “f w”**. 2016, 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CENTRAL DO ACRÍLICO. **Tubos de Acrílico**. 2020. Disponível em: <https://www.centraldoacrilico.com.br/produtos/tubos-de-acrilico>. Acesso em: 20 set. 2020.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

DARIDO, S. C., RANGEL, I. C. A. **Educação Física na Escola**. 2. ed. Rio de Janeiro: Genesis, 2017.

DICKNOW, S. R. **Dimensionamento de transportador pneumático para resíduos de cereais**. 2013, 66 f. Monografia (Graduação) – Curso do Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

FECOMÉRCIO SÃO PAULO. **Busca por qualidade de vida fortalece mercado de suplementos nutricionais**. 2016. Disponível em: <https://www.fecomercio.com.br/noticia/busca-por-qualidade-de-vida-fortalece-mercado-de-suplementos-nutricionais>. Acesso em: 08 nov. 2020.

FILIPPO FILHO, G. **Automação de Processos e de Sistemas**. São Paulo: Érica, 2014.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FREITAS, M. S.; CARVALHO, P. C. O.; SALES, R. de C.; SILVA, V. C. da; ZANCA, J. F. R. Modelagem teórica do campo magnético em solenoides. **Revista de Trabalhos Acadêmicos UNIVERSO São Gonçalo**, v. 1, n. 2, 2016.

GOMIDE, R. **Operações unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares**. São Paulo: R. Gomide, 1983.

HARAGUCHI F. K.; ABREU W. C.; PAULA H. Proteínas do soro do leite: composição, propriedades nutricionais, aplicações no esporte e benefícios para a saúde humana. **Revista Brasileira de Nutrição**, v. 19, n. 4, p. 479-488, 2006.

KLINZING, G. E.; RIZK, F.; MARCUS, R. D.; LEUNG, L. S. **Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach**. 3. ed. New York: Springer, 2010.

KFF AUTOMAÇÃO. Filtros de ar comprimido. 2020. Disponível em: <https://www.kffautomacao.com.br/filtros-ar>. Acesso em: 28 out. 2020.

MASTER TECNOLOGIA INDUSTRIAL. **Válvula solenoide pneumática – tipos e funções**. 2020. Disponível em: <https://www.mtibrasil.com.br/artigos/valvula-solenoide.php>. Acesso em: 28 out. 2020.

MASTER TECNOLOGIA INDUSTRIAL. **VS5 - Válvula pneumática solenoide 5/2 e 5/3**. 2020. Disponível em: <https://www.mtibrasil.com.br/Produ/valvula-pneumatica-solenoide-5-2.php>. Acesso em: 17 out. 2020.

MAXIMIANO, C. M. B. F.; SANTOS, L. C. Consumo de Suplementos por Praticantes de Atividade Física em Academias de Ginástica da Cidade de Sete Lagoas-MG. **Revista Brasileira de Nutrição Esportiva**, São Paulo, v. 11, n. 61, p. 93-101, 2017.

METALIS. **Grupo METALIS**. 2020. Disponível em: <http://www.metalis.com.br/2013/index.php>. Acesso em: 08 nov. 2020.

MILLS, D. **Pneumatic conveying design guide**. 3. ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2015.

MONGE NETO, A. A. **Interação de peptídeos provenientes da hidrólise enzimática de farelo de soja com ciclodextrinas – avaliação da redução do amargor**. 2013, 37 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

OLIVEIRA FILHO, U. C. **Desenvolvimento de um secador spray para obtenção de pós finos de precursores de nióbio**. 2007. F. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

OLIVEIRA, G. da S. de.; OLIVEIRA, L. S. P. de; CAVALLARI, M. E.; GOMES, M. L.; PAIVA, V. B. **MDLGV – Indústria LTDA: processo produtivo de whey protein**. 2018, 205 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2018.

OLIVEIRA, L. G. de. **Mercado de Vitaminas e Suplementos Alimentares: competitividade e estratégias competitivas**. 2015, 51 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

PIAB. **Smart Solutions for the automated World**. 2020. Disponível em: <https://www.piab.com/pt-BR/>. Acesso em: 20 set. 2020.

ROSSO. **Válvula Rotativa**. 2018. Disponível em: <https://www.rosso.ind.br/produtos/valvula-rotativa/valvula-rotativa/68/va%EF%BF%BDIvula-rotativa>. Acesso em: 08 nov. 2020.

SCHULZ. **Catálogo Geral de Produtos**. 2018. Disponível em: <https://www.schulz.com.br/wp-content/uploads/2018/11/Catalogo-Motocompressores-de-Pistao-Schulz-Jet-Facil-ago-18-MI.pdf>. Acesso em: 19 set. 2020.

SILVA, D. R. da. **Transporte pneumático: Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. São Paulo: Artliber Ltda, 2005.

SOUZA, A. C. A. **avaliação do conhecimento e do uso de suplementos alimentares e esteroides anabolizantes por usuários de academias na cidade de Lagarto-SE**. 2018, 69 f. Monografia (Graduação) – Curso de Farmácia, Universidade Federal de Sergipe, Lagarto, 2018.

TADINI, C. C.; NICOLETTI, V. R.; MEIRELLES, A.; FILHO, P.A. P. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

TEIXEIRA, C. **Transporte pneumático: Conceitos e especificações**. Rio de Janeiro: Bonecker, 2019.

TELIS-ROMERO, J.; VIGANÓ, J.; MOSER, P. Escoamento em Meios Porosos. In: TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. de. A.; PESSOA FILHO, P. de A. (Org.) **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 213-258.

VERONEZ, I. P. Suplementos Alimentares. **Portal educação**, 2012. Disponível em: < <https://siteantigo.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/conteudo/suplementos/10711> >. Acesso em: 23 mar. 2020.

VIOTTO, W. H.; MACHADO, L. M. P. Estudo sobre a cristalização da lactose em doce de leite pastoso elaborado com diferentes concentrações de soro de queijo e amido de milho modificado. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Minas Gerais, v. 62, n. 4, p.16-21, 2007.

YANSEN, I. Whey Protein: História e propriedades. **FISlulturismo.com.br**, 2011. Disponível em: < <https://siteantigo.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/conteudo/suplementos/10711> >. Acesso em: 03 mar. 2020.

ZAVAREZE, E. R.; MORAES, K. S.; SALAS-MELLADO, M. M. Qualidade tecnológica e sensorial de bolos elaborados com soro de leite. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, São Paulo, v. 30, n.1, p. 102-106, 2010.

ZION MARKET RESEARCH. **Global Whey Protein Market Is Set for a Rapid Growth and is Expected to Reach USD 12.4 Billion by 2024**. 2018. Disponível em: < <https://www.zionmarketresearch.com/news/protein-supplements-market> >. Acesso em: 15 mar. 2020.